

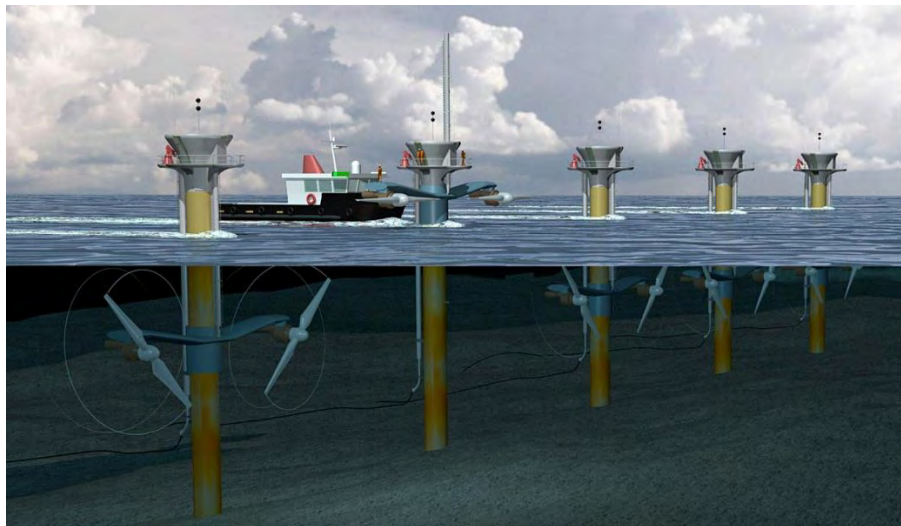


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΑΛΙΡΡΟΪΚΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

υπό

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΣΑΡΑΝΤΑΚΗ



Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2017

© 2017 Αλέξανδρος Σαραντάκης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος
 Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
 Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΑΛΙΡΡΟΪΚΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΑΡΑΝΤΑΚΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2017

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος,
Καθηγητής Πειραματικών Φαινομένων Μεταφοράς

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αναπτυχθεί μεγάλη επιστημονική έρευνα σχετικά με την αξιοποίηση των υδάτινων πόρων σε λίμνες, ποταμούς και θάλασσες ανά τον κόσμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται μία αναλυτική μελέτη κατασκευών που έχουν αναπτυχθεί για την εκμετάλλευση της ενέργειας των παλιρροϊκών ρευμάτων. Το περιεχόμενο της εργασίας έγκειται στα είδη των παλιρροϊκών υδατοστροβίλων, για τους οποίους αναπτύσσονται εκτενώς οι αρχές σχεδιασμού και λειτουργίας τους, ενώ γίνεται επίσης ιδιαίτερη αναφορά στους κατασκευαστικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη δομή και την αποδοτικότητά τους. Παλιρροϊκοί υδροστροβίλοι είναι συσκευές οι οποίες, εκμεταλλεύόμενες την παλιρροϊκή δραστηριότητα διάφορων περιοχών, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Αρχικά, αναλύεται ενδελεχώς η φυσική υπόσταση του παλιρροϊκού φαινομένου όπως και οι αρχές λειτουργίας αυτών των στροβιλομηχανών. Έπειτα, γίνεται μία εκτενής αναφορά στις σύγχρονες μεθόδους σχεδιασμού κατασκευών αυτού του είδους και απαριθμούνται κάποια από τα κυριότερα παραδείγματα παλιρροϊκών υδροστροβίλων σε συνδυασμό με πλήθος πληροφοριών σχετικών με αυτούς. Στη συνέχεια, παρατίθενται όλες οι υπάρχουσες περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με το συγκεκριμένο κλάδο, καθώς και πληροφορίες για πιθανώς αξιοποιήσιμα γεωγραφικά σημεία του ελλαδικού χώρου για την εγκατάσταση παλιρροϊκών υδρογεννητριών. Κατόπιν της ανάπτυξης όλων των παραπάνω πληροφοριών καταλήγουμε σε συμπεράσματα αναφορικά με την ύπαρξη και εξέλιξη του κλάδου αυτού.

APPLICATIONS OF TIDAL HYDROTURBINES

ALEXANDROS SARANTAKIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2017

Supervisor: Dr Nikolaos Andritsos

Professor of Experimental Transport Phenomena

Abstract

Great scientific researches have been carried out the last decades related with the exploitation of water resources for electricity production. In this thesis, a study is being done about the developed structures for the exploitation of energy produced by tidal currents. The substance matter is the different types of tidal hydro-turbines and there has been a wide study on the principles of operation and design as well as on the manufacturing, economic and environmental factors that affect their structure and efficiency.

Tidal hydro-turbines are devices that by exploiting the tidal activity, produce electricity. Initially, the substance of the tidal phenomena and the principles of operation of the tidal turbines are thoroughly analysed. Afterwards, an extensive report about the modern methods of design takes place in the thesis as well as an enumeration of some of the most important examples of tidal turbines combined with plenty of information about them. Moreover, the environmental concerns of the discipline are quoted and there is a chapter about a couple of areas in Greece with intense tidal activity which would be possibly exploitable for the installation of tidal turbines. In the end, there is a conclusion referring to the presence and development of the tidal turbines around the world.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	2
1.1. Κίνητρο και υπόβαθρο.....	2
1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	3
1.3. Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	3
Κεφάλαιο 2. Ενεργειακή αξιοποίηση των παλιρροϊκών ρευμάτων.....	5
Κεφάλαιο 3. Το φαινόμενο της παλίρροιας.....	12
Κεφάλαιο 4. Λειτουργία των παλιρροϊκών στροβίλων.....	20
4.1. Αξονικοί στρόβιλοι.....	24
4.2. Ακτινικοί στρόβιλοι	29
4.3. Μοντέλο ανάλυσης κόστους παραγωγής ενέργειας.....	32
4.4. Σπηλαίωση.....	34
4.5. Παλιρροϊκά φράγματα.....	36
Κεφάλαιο 5. Αρχές και σύγχρονες μέθοδοι υπολογιστικού σχεδιασμού ...	38
Κεφάλαιο 6. Σύγχρονοι παλιρροϊκοί υδατοστρόβιλοι	47
Κεφάλαιο 7. Περιβαλλοντικές ανησυχίες.....	59
7.1. Ενεργειακή ανάλυση παλιρροϊκού ρεύματος.....	60
7.2. Επιρροές στη θαλάσσια ζωή	63
7.3. Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	65
Κεφάλαιο 8. Παλιρροϊκή ενέργεια στον Ελλαδικό χώρο.....	67
8.1. Πορθμός του Ευρίπου	67
8.2. Στενό Ρίου- Αντιρρίου	69
Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα.....	71
Βιβλιογραφία	73

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Κίνητρο και υπόβαθρο

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται συνεχώς όλο και πιο εκτενής λόγος παγκοσμίως για τις συνέπειες της υπερθέρμανσης του πλανήτη καθώς και για την διαρκή μείωση των αποθεμάτων των διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων. Η υπερθέρμανση του πλανήτη υφίσταται λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο δημιουργείται από τη μεγάλη συσσώρευση αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Σε αυτό συμβάλλουν τα ορυκτά καύσιμα όπου με την καύση τους για την αξιοποίηση της εξέργειάς τους, εκλύουν ρύπους στην ατμόσφαιρα. Επίσης, λόγω του ότι τα περισσότερα τεχνολογικά συστήματα παραγωγής και εκμετάλλευσης ενέργειας είναι βασισμένα στην καύση ορυκτών καυσίμων, τα αποθέματά τους μειώνονται και επομένως γίνεται επιτακτική η ανάγκη στροφής σε άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας και εκμετάλλευσης πόρων διαφορετικών από τα ορυκτά καύσιμα, πόρων που η εκμετάλλευσή τους δεν κρίνεται περιβαλλοντικά και οικονομικά ζημιογόνος. Σε αυτό το σημείο είναι που έρχεται η επιλογή των εναλλακτικών και ανανεώσιμων μορφών ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική και η παλιρροϊκή ενέργεια.

Η εκμετάλλευση της παλιρροϊκής ενέργειας χρονολογείται από τη δεκαετία του 1960 και τη δημιουργία του «παλιρροϊκού φράγματος» στον ποταμό Ρανς στη Βρετάνη της Γαλλίας. Έπειτα, υπήρξαν πολλές μελέτες και εγκαταστάσεις για την εκμετάλλευση των παλιρροϊκών ρευμάτων και κυμάτων με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αντικείμενο μελέτης είναι η εκμετάλλευση των παλιρροϊκών ρευμάτων. Αυτό γίνεται μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων στροβιλομηχανών, των παλιρροϊκών υδροστροβίλων.

Οι παλιρροϊκοί υδροστροβίλοι είναι ένας κλάδος της ενεργειακής τεχνολογίας που τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη. Η περιβαλλοντικά φιλική τους δομή και

λειτουργία τούς έχει αναδείξει ως ιδιαίτερα δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να ανακεφαλαιώσει όλες τις βασικές αρχές του κλάδου των παλιρροϊκών στροβίλων προκειμένου να αποσαφηνιστεί και να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους σε κάποιον που θέλει να έχει μία γενική εικόνα σχετικά με το συγκεκριμένο κλάδο.

1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τη σύνοψη όσων έχουν ήδη μελετηθεί, αναλυθεί και εφαρμοστεί σχετικά με τους παλιρροϊκούς στροβίλους. Για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας χρειάστηκε η προσφυγή σε εργασίες επιστημόνων οι οποίοι έχουν μελετήσει τις διάφορες τεχνολογίες της παλιρροϊκής ενέργεια σε υπολογιστικό και πειραματικό επίπεδο. Ενδεικτικά αναφέρεται η συνεισφορά σε αυτό το πεδίο του Peter L. Fraenkel (τεχνικού διευθυντή της Marine Current Turbines), αλλά και ακαδημαϊκών, όπως ο καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Southampton AbubakrS. Bahaj.

Σημαντικό ρόλο παίζει και το πλούσιο υλικό που διατίθεται από εταιρίες, που δραστηριοποιούνται στο χώρο στις ηλεκτρονικές τους διευθύνσεις. Παραδείγματα τέτοιων εταιριών είναι η Openhydro και η Alstom. Επίσης, σημαντικές πληροφορίες συλλέχθηκαν από το υλικό Ελλήνων επιστημόνων, όπως ο Καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας κ. Ερρίκος Σταπουντζής και ο πρώην μεταπτυχιακός φοιτητής του Πανεπιστημίου Πατρών Δημήτριος Κονδύλης.

1.3. Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε οκτώ ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 ως 9, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μία εισαγωγή στη φιλοσοφία της εκμετάλλευσης της παλιρροϊκής ενέργειας. Αναφέρουμε που, τότε και γιατί άρχισε να γίνεται μία στροφή προς τέτοιες μορφές παραγωγής ηλεκτρισμού, κάνοντας, επιπλέον, μία πρώτη αναγνωριστική «ματιά» σε σημαντικές – τέτοιων ειδών- εγκαταστάσεις.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται εκτενώς η μελέτη του φαινομένου της παλίρροιας βάσει κάποιων απλών σχέσεων ρευστομηχανικής. Αναλύουμε τη συμπεριφορά του και εν

συνεχεία την ενεργειακή της ισχύ, κάνοντας αναφορά σε κάποιες ενδεικτικές –και υψηλά υποσχόμενες- τοποθεσίες ανά τον κόσμο.

Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται ενδελεχώς η λειτουργία των παλιρροϊκών στροβίλων. Μελετούμε το πως τέτοιες στροβιλομηχανές (ακτινικής και αξονικής ροής) αποδίδουν έργο, βασιζόμενοι στις αρχές δομής και λειτουργίας τους. Ύστερα ανατρέχουμε στις πρώτες ιδέες που αναπτύχθηκαν καθώς και στα είδη στροβιλομηχανών που έχουν προταθεί και αναπτυχθεί, γύρω από αυτόν τον κλάδο, όπως κλασσικά παραδείγματα στροβίλων Kaplan, Francis κ.ά.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση των αρχών σχεδιασμού βάσει των ενεργειακών και κατασκευαστικών παραμέτρων, όπως και των παραδοχών που γίνονται. Γίνεται επίσης αναφορά σε σύγχρονα σχεδιαστικά προγράμματα, φέρνοντας παραδείγματα σχεδιαστικών αναλύσεων σε υπολογιστικό περιβάλλον, αναδεικνύοντας έτσι τη σημασία και την προσφορά τους.

Οι διάφοροι τύποι υδατοστροβίλων του εμπορίου παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6. Αναλύονται τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, ενώ αναφέρουμε τις αρχές σχεδιασμού τους από την εκάστοτε εταιρία όπως και σημεία του κόσμου στα οποία έχουν βρει εφαρμογή.

Στο Κεφάλαιο 7 αναλύονται εκτενώς οι περιβαλλοντικές ανησυχίες που προκύπτουν στον κλάδο αυτό. Τέτοιες ανησυχίες προκύπτουν από τις διαταραχές που μπορούν να συμβούν στη θαλάσσια πανίδα και χλωρίδα, αλλά και από την ενεργειακή αποδυνάμωση σημαντικών ρευμάτων, γεγονός που ενδέχεται να δημιουργούν επιπτώσεις στο κλίμα και τη θαλάσσια ζωή.

Στο Κεφάλαιο 8 γίνεται αναφορά και ανάλυση της θαλάσσιας δραστηριότητας που συμβαίνει στο Ελληνικό χώρο και συγκεκριμένα στον πορθμό του Ευρίπου και στο στενό Ρίου-Αντιρρίου. Οι δύο αυτές τοποθεσίες αποτελούν περιοχές με έντονη παλιρροϊκή δραστηριότητα και αυτό τις αναδεικνύει σε δυνητικά αξιοποιήσιμες περιοχές εγκατάστασης παλιρροϊκών υδροστροβίλων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 ανακεφαλαιώνονται όσα έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, καταλήγοντας έτσι σε επί μέρους και συνολικά συμπεράσματα για την εξέλιξη των παλιρροϊκών στροβίλων. Με αυτόν τον τρόπο, αναπτύσσεται μία γενική εικόνα αναφορικά με την περιβαλλοντική και ενεργειακή σημασία του κλάδου.

Κεφάλαιο 2. Ενεργειακή αξιοποίηση των παλιρροϊκών ρευμάτων

Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, σε πολλές περιοχές του κόσμου η ηλεκτρική ενέργεια άρχισε να είναι προσβάσιμη στο ευρύ κοινό των αστικών κέντρων. Με την πάροδο των χρόνων, ο ηλεκτρισμός γινόταν όλο και πιο διαδεδομένος στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, ξεφεύγοντας σιγά σιγά από τα όρια των πόλεων. Η εξέλιξη της βιομηχανίας και της παραχθείσας τεχνολογίας έκανε την ανάγκη του ηλεκτρικού ρεύματος συνεχώς επιτακτικότερη, ενώ η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού οδηγεί στη διαρκώς αυξανόμενη ζήτησή της.

Αυτοί οι παράγοντες οδήγησαν τις ανθρώπινες κοινωνίες σε αναζήτηση εύρεσης κατάλληλων γεωγραφικών σημείων και φυσικών πόρων για την ανάπτυξη αξιοποιήσιμων δομών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, η αξιοποίηση των ορυκτών πόρων έγινε η πρώτη ευρεία λύση αναφορικά με τη ζήτηση ηλεκτρισμού. Σε πρώτο στάδιο, ο λιγνίτης και έπειτα καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο προσφέρονταν σε τεράστια αποθέματα ανά τον κόσμο και η εκμετάλλευσή τους ήταν άμεσο επακόλουθο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν διάφορες μορφές εκμετάλλευσης καυσίμων όπως το προπάνιο αλλά και δραστηριοτήτων όπως η γεωθερμία.

Ωστόσο, με τα χρόνια υπήρξαν δύο κύριοι παράγοντες που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στις μορφές παραγωγής ενέργειας. Ο πρώτος ήταν η συνεχής αύξηση της ζήτησης, όπως αναφέρθηκε προτύτερα. Ο δεύτερος ήταν ότι η πλέον «παραδοσιακή» αξιοποίηση της καύσης ορυκτών πόρων ευθυνόταν για τη δημιουργία χιλιάδων περιβαλλοντικών προβλημάτων αλλά και προβλημάτων υγείας σε εκατομμύρια ανθρώπους.

Η έκλυση ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα όπως και πληθώρας βαρέων μετάλλων έχει δημιουργήσει και εξακολουθεί να δημιουργεί ζητήματα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου (άρα και η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη), ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδροφόρων οριζόντων, καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος, ερημοποίηση περιοχών και υπερεκμετάλλευση φυσικών πόρων. Με τη σειρά τους, αυτά τα ζητήματα δημιουργούν προβλήματα υγείας σε μεγάλο αριθμό ανθρώπων όπως αυξημένες καρδιοαγγειακές παθήσεις, αυξημένα κρούσματα καρκίνου, αναπνευστικές δυσλειτουργίες αλλά και πλήθος παθήσεων που επιδεινώνονται από την κλιματική αλλαγή.

Καθίσταται, όπως είναι φανερό, επιτακτική η ανάγκη περιορισμού της καύσης λιγνίτη, πετρελαίου, φυσικού αερίου και άλλων ομοειδών οργανικών καυσίμων. Προκειμένου να είναι εφικτός ένας τέτοιος περιορισμός, πρέπει να υπάρξει μία στροφή σε μορφές παραγωγής ενέργειας βιώσιμες, περιβαλλοντικά αποδεκτές καθώς και αρκετά αποδοτικές έτσι ώστε να καλυφθεί το ενεργειακό «κενό» που ενδέχεται να δημιουργηθεί.

Έτσι ξεκίνησε η ανάπτυξη αυτού που σήμερα αποκαλείται «ανανεώσιμες μορφές ενέργειας». Με τον όρο αυτό γίνεται αναφορά στις μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες βασίζονται στην εκμετάλλευση της περιοδικότητας και επαναληπτικότητας ενός φυσικού φαινομένου χωρίς όμως να υφίσταται από αυτές υποβάθμιση του φυσικού τους περιβάλλοντος.

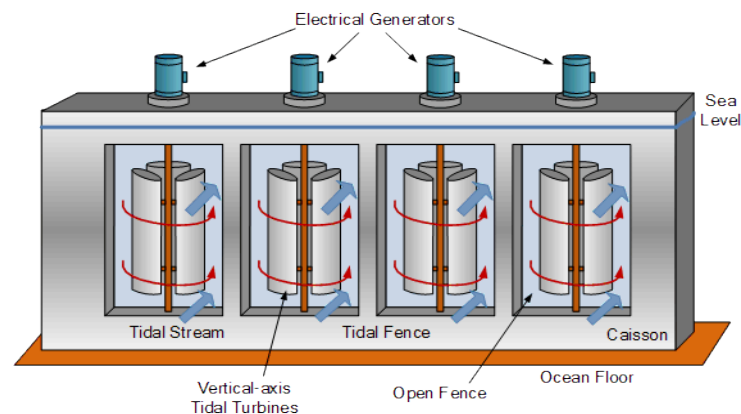
Τέτοιες μορφές εκμετάλλευσης είναι αυτές της αιολικής, της ηλιακής και της υδροδυναμικής ενέργειας. Ένας κλάδος της υδροδυναμικής εκμετάλλευσης είναι αυτός της παλιρροϊκής εκμετάλλευσης και πιο συγκεκριμένα των παλιρροϊκών υδροστροβίλων, ο οποίος θα αναλυθεί ενδελεχώς στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η εκμετάλλευση της παλιρροϊκής ενέργειας έγκειται στη χρήση των κυμάτων και ρευμάτων που δημιουργούνται από το φαινόμενο της παλίρροιας. Οι λόγοι που οδήγησαν προς την αξιοποίηση της κίνησης των υδάτινων μαζών ήταν πολλοί και ποικίλοι.

Καταρχάς, όπως ειπώθηκε στις παραπάνω παραγράφους, μία στροφή σε μορφές ενέργειας λιγότερο ρυπογόνους έχει καταστεί αναγκαία. Σε αυτή την αιτία, έρχεται να προστεθεί το γεγονός ότι ο πλανήτης μας καλύπτεται από υδάτινες περιοχές σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70%. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πάρα πολλά σημεία στον κόσμο που προσφέρονται για εναλλακτική παραγωγή ηλεκτρισμού (**Fraenkel, 2005**). Η παλίρροια, με τη σειρά της, έρχεται να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες για τη δημιουργία υδροηλεκτρικών σταθμών καθώς με τη δραστηριότητά της παρέχει σε πολλές περιοχές της γης τεράστια ποσά αξιοποιήσιμης κινητικής ενέργειας τόσο με τη δημιουργία κυμάτων αλλά και πολύ περισσότερο με τη δημιουργία ρευμάτων σε ποτάμια, θάλασσες και σπανιότερα σε λίμνες. Επιπλέον, η επαναληπτικότητα και η περιοδικότητα του φαινομένου καθιστά την αξιοποίησή του ανανεώσιμη καθώς δεν υπάρχει η εξάρτηση από αποθέματα ορυκτών καυσίμων με πεπερασμένη διάρκεια χρήσης. Οι προοπτικές της παλιρροϊκής ενέργειας διαφαίνονται πολλά υποσχόμενες αν αναλογισθεί κανείς ότι σύμφωνα με έρευνες το Ηνωμένο Βασίλειο θα μπορούσε να καλύπτει μέχρι και το 1/3 των αναγκών του σε ηλεκτρισμό από τέτοιες εγκαταστάσεις, ενώ υπάρχουν μηχανικοί που υποστηρίζουν ότι πολύ σύντομα θα είναι εφικτή η λειτουργία ωκεάνιων σταθμών ισχύος 300 MW (**Bahaj&Myers, 2005**).

Η πρώτη, μεγάλης έκτασης εγκατάσταση για την αξιοποίηση της παλιρροϊκής δραστηριότητας έγινε το 1966 στις εκβολές του γαλλικού ποταμού Ρανς (Rance Tidal Power Station, Βρετάνη), με την εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας να ανέρχεται στα 240 MW. Η δομή της συγκεκριμένης μονάδας βασίστηκε στη (μετέπειτα παραδοσιακή) μέθοδο της τοποθέτησης ενός γιγάντιου «φράχτη» μέσα από τον οποίο υπάρχουν δίοδοι από όπου περνά η εκβολή του ρεύματος. Εντός των διόδων, υπάρχουν συστοιχίες από τουρμπίνες, οι οποίες τίθενται σε λειτουργία από τα επιταχυνόμενα υδάτινα ρεύματα και έτσι συντελείται η παραγωγή μηχανικής ενέργειας που στη συνέχεια τροποποιείται σε ηλεκτρική. Πάνω στη φιλοσοφία αυτής της τεχνολογίας έγινε αναγκαία η λειτουργία αντλιών με σκοπό να διοχετεύουν τα ρεύματα σε συγκεκριμένα σημεία και κατευθύνσεις, προκειμένου να μεγιστοποιείται η παραχθείσα ισχύς, αλλά και να αντισταθμίζονται πιθανές επιπτώσεις στην παλιρροϊκή ροή. Παρόμοιου τύπου δομές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναπτύχθηκαν τις προηγούμενες δεκαετίες κοντά στις δυτικές ακτές της Αυστραλίας, όπως και σε κάποια σημεία του Ινδικού ωκεανού (**Baker, 1991**). Ωστόσο, οι συγκεκριμένες μορφές ηλεκτρικών σταθμών αποδεικνύονται σε μακροπρόθεσμο διάστημα περιβαλλοντικά και οικονομικά μη αποδεκτές.

Αυτό συμβαίνει διότι οι τεράστιες δομικές κατασκευές που απαιτούνται έχουν τεράστια κόστη ενώ έχουν αρνητικές επιπτώσεις για τη συμπεριφορά όχι μόνο των υδάτινων ροών αλλά και για τις τοπικές μορφές χλωρίδας και πανίδας.

Επίσης, ενδέχεται να δημιουργούν αισθητές ροϊκές αναδιαμορφώσεις σε περιοχές με έντονη ναυτιλιακή δραστηριότητα (**Kirke, 2014**). Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η δομή και λειτουργία ενός τυπικού παλιρροϊκού «φράχτη» καθώς και η εγκατάσταση εκμετάλλευσης της παλιρροϊκής δραστηριότητας του ποταμού Ρανς.



Εικόνα 2.1: Η δομή ενός παλιρροϊκού «φράχτη».
Πηγή: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/images/stories/tidal/alt95.gif>



Εικόνα 2.2: Η παλιρροϊκή εγκατάσταση του ποταμού Ρανς στη Γαλλία.
(Πηγή: <http://tidalenergytoday.com/wp-content/uploads/2015/01/video-the-rance-tidal-power-station.jpg>)

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ιδέα του παλιρροϊκού φράχτη σε μεγάλο βαθμό έμεινε στο παρελθόν για τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Έτσι, άρχισε η εντατικοποιημένη μελέτη υδροστροβίλων, οι οποίοι δε μετέβαλλαν την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος και η μετατροπή της κινητικής ενέργειας αυτού σε μηχανική γινόταν απευθείας στο δρομέα μίας τουρμπίνας. Με πιο απλά λόγια, υπήρξε μία στροφή σε πρότυπα υποθαλάσσιων (κυρίως) σταθμών ανάλογων των ανεμογεννητριών. Η πρώτη μελέτη αυτών των στροβιλομηχανών άρχισε να γίνεται κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1970 από το πανεπιστήμιο του Ρέντινγκ στο Ηνωμένο Βασίλειο (**Kirke, 2014**). Ωστόσο, οι πρώτες εγκαταστάσεις έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από τη βρετανική εταιρία Marine Current Turbines Ltd. (MCT) κοντά στις βορειο-ιρλανδικές ακτές. Η υδροτουρμπίνα SeaFlow έγινε το πρώτο παράδειγμα μαζικής εγκατάστασης με ισχύ που έφτανε τα 300 kW, αρκετά για να καλύψουν τις ηλεκτρικές ανάγκες ενός οικισμού με διακόσια νοικοκυριά.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, πολλές εταιρίες ανέπτυξαν τις δικές τους ευρεσιτεχνίες παλιρροϊκής ενέργειας όπως η Alstom, η OpenHydro, η Schulzer κ.ά.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ένας παλιρροϊκός στρόβιλος είναι τα παρακάτω (**Baker, 1991**):

- α) Το κόστος εγκατάστασης και κατασκευής είναι χαμηλό συγκριτικά με άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρισμού.
- β) Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι πολύ μικρές και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.
- γ) Συναντάται τεράστιο γεωγραφικό εύρος εφαρμογών σε λίμνες ποτάμια και θάλασσες.

Παρά ταύτα, υπάρχουν και μειονεκτήματα, πολλά εξ αυτών εκλείπουν καθώς αναπτύσσονται διάφορες μελέτες γύρω από αυτόν τον κλάδο. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα παρακάτω:

- α) Πολλές φορές ενδέχεται να υπάρξουν πολύ μεγάλες οπισθέλκουσες δυνάμεις στη γεννήτρια με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η ύπαρξη βαρύτερων στηρίξεων, άρα το κόστος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά.
- β) Η ύπαρξη φυκιών στα περύγια του δρομέα μπορεί να αποφέρει μειωμένη αποδοτικότητα στην τουρμπίνα.
- γ) Λόγω του υδάτινου περιβάλλοντος, ο κίνδυνος διάβρωσης είναι μεγάλος.
- δ) Η γεννήτρια μπορεί να μείνει εκτεθειμένη σε πολύ ακραία καιρικά φαινόμενα, που θα έχουν ως αποτέλεσμα πιθανές ζημιές.

- ε) Είναι πιθανή η δημιουργία φθοράς και ζημιάς λόγω της ναυτιλιακής δραστηριότητας.
- στ) Μία τέτοιου είδους εγκατάσταση μπορεί να δημιουργήσει οικολογικά προβλήματα, διότι παρά το γεγονός ότι είναι μία φιλική περιβαλλοντικά μονάδα, ενδέχεται η ύπαρξη αναδιοργάνωσης της τοπικής χλωρίδας και πανίδας (Boehlert&Gill, 2010).

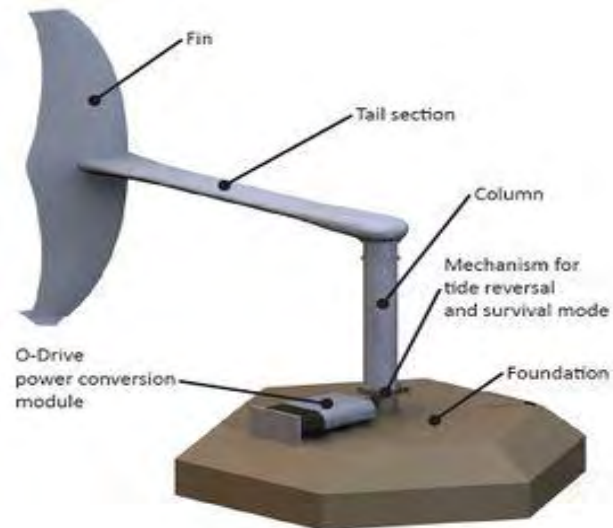


Εικόνες 2.3 και 2.4: Η παλιρροϊκή γεννήτρια SeaFlow της εταιρίας MCT Ltd (αριστερά) και προσομοίωση συστοιχιών υδροστροβίλων ή «παλιρροϊκής φάρμας» (δεξιά).

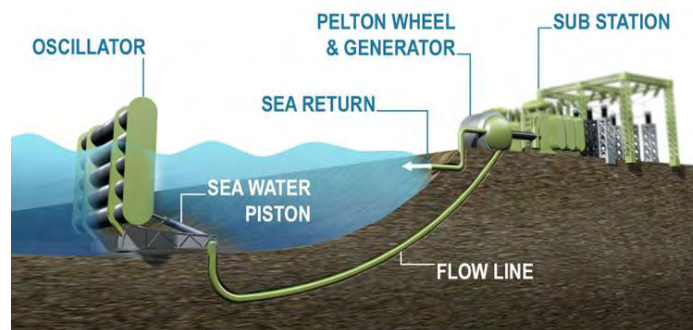
Πηγές: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Seafloow_raised_16_jun_03.jpg
και http://www.robaid.com/wp-content/gallery/tech1/thumbs/thumbs_scottishpower-renewables-tidal-farm.jpg

Πέραν όμως από τη χρήση στροβιλομηχανών για την αξιοποίηση των υδάτινων ρευμάτων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες συσκευές, ιδιαίτερης τεχνολογικής φιλοσοφίας, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια των κυμάτων και των ρευμάτων σε μηχανική, έτσι ώστε να μετατραπεί εν συνεχεία σε ηλεκτρική. Τέτοιες κατασκευές αποτελούν κάποιες μορφές τροποποιημένων πτερυγίων που εκμεταλλεύονται την άνωση που τους ασκείται από τις υδάτινες μάζες, πραγματοποιούν ταλάντωση. Η ταλάντωση μέσω μηχανικών εξαρτημάτων φτάνει στην ακτή όπου εκεί σε ειδικά διαμορφωμένους σταθμούς από μηχανική μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το bioSTREAM της εταιρίας BioPowerSystems και το Oyster της εταιρίας Aquamarine Power. Η πρώτη παράγει ταλάντωση εκμεταλλευόμενη τα παλιρροϊκά ρεύματα ενώ η δεύτερη τα παραχθέντα κύματα.



Εικόνα 2.5: Εικονική αναπαράσταση της συσκευής bioSTREAM όπου φαίνονται τα δομικά της στοιχεία.
Πηγή: http://www.envirogadget.com/wp-content/uploads/2008/07/shark_fin_power.png



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται η λειτουργία του ευρύτερου συνδεδεμένου συστήματος στη συσκευή Oyster και η πορεία που ακολουθεί η μηχανική ενέργεια.
Πηγή: <https://www.lopedevega.es/wiki/images/Oyster-system-diagram-largeb.jpg>

Κεφάλαιο 3. Το φαινόμενο της παλίρροιας

Παλίρροια ονομάζεται το φαινόμενο εναλλαγής της στάθμης της θαλάσσιας επιφάνειας και οφείλεται στη βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ της γης, της σελήνης και του ήλιου. Στο φαινόμενο αυτό παρατηρείται περιοδική εναλλαγή της θαλάσσιας κίνησης ως προς τη φορά, το μέτρο και τη διεύθυνση, κάτι που μπορεί να προβλεφθεί, καθώς κατά βάση παρουσιάζει έναν αέναο κύκλο επαναληπτικότητας.

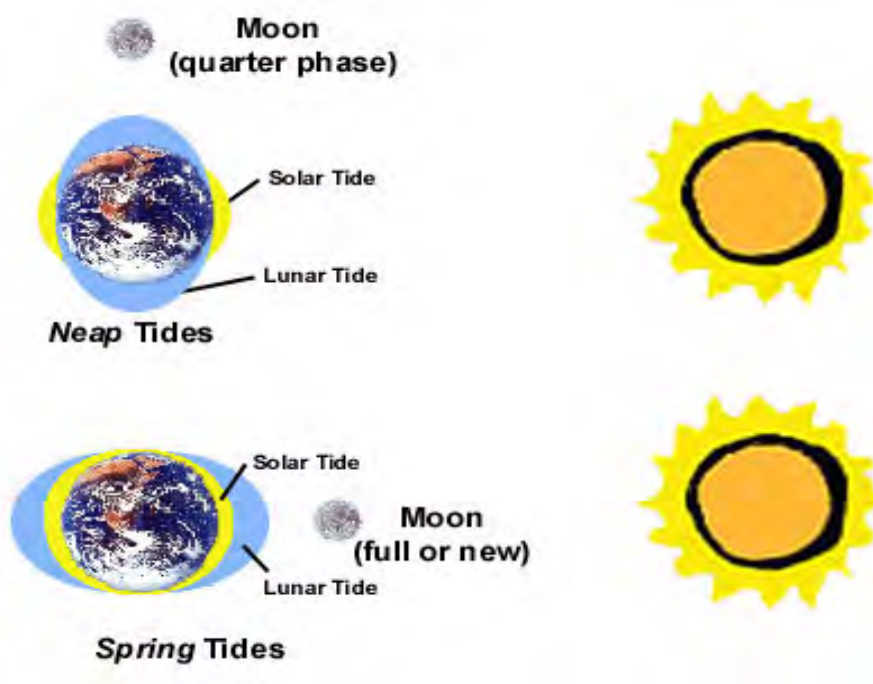
Το παλιρροϊκό εύρος είναι η διαφορά ύψους ανάμεσα στην άμπωτη (το μικρότερο ύψος της επιφανειακής στάθμης) και την πλημμυρίδα (το μεγαλύτερο ύψος της επιφανειακής στάθμης), και μπορεί να κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα. Αυτό διαφέρει από περιοχή σε περιοχή ανάλογα την ωκεανογραφία, τη βαθυμετρία αλλά και τη παγκόσμια θέση του σημείου (καθώς ορίζεται και εξ αυτής η επιρροή της βαρυτικής αλληλεπίδρασης που αναφέρθηκε προτύτερα). Σε αυτά έρχονται να προστεθούν και τα καιρικά φαινόμενα, καθώς σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του παλιρροϊκού φαινομένου παίζει πολλές φορές η –κατά τόπους- ταχύτητα και ένταση διάφορων ανέμων επηρεάζοντας έτσι την παρουσία κυμάτων, άρα και του παλιρροϊκού εύρους. Τα παλιρροϊκά ρεύματα είναι η –παραλληλεπίπεδη ως προς την υδάτινη επιφάνεια- κίνηση των υδάτων, κάτι που δημιουργείται λόγω της αύξησης και της μείωσης του ύψους της επιφανειακής στάθμης. Το φαινόμενο της παλίρροιας, παρότι είναι συνηθέστερο σε θαλάσσιες περιοχές, είναι εμφανές σε ποταμούς όπως επίσης και σε λίμνες. Στις περισσότερες παράκτιες περιοχές, το φαινόμενο της παλίρροιας παρατηρείται δύο φορές ημερησίως, δηλαδή μέσα σε ένα 25ωρο (24 ώρες και 50 λεπτά), θα υπάρξει δύο φορές άμπωτη και δύο πλημμυρίδα (**Bernshtein&Haeyang, 1996**). Αυτό σημαίνει ότι η περίοδος του φαινομένου είναι 12 ώρες και 25 λεπτά, δηλαδή $T=12.4$ h.

Ο ήλιος και η σελήνη ασκούν ελκτικές δυνάμεις στη γη, άρα και στις υδάτινες περιοχές αυτής. Παρόλο που η σελήνη είναι αμελητέα μάζα ως προς αυτήν του ήλιου, η απόσταση του ήλιου από τη γη είναι 360 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της σελήνης (**Nichols-Lee, 2011**). Οπότε, η κύρια ελκτική δύναμη όπου ασκείται στη γη είναι αυτή της σελήνης. Οι δυνάμεις που προκαλούν την παλίρροια μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση όπου αναπτύχθηκε από το Newton, για τη βαρυτική δύναμη που ασκείται σε ένα σύστημα δύο σωμάτων (**Hardistry, 2009**):

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{R^2} \quad (3.1)$$

όπου G είναι η παγκόσμια βαρυτική σταθερά και ισούται με $6.673 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$, m_1 και m_2 οι μάζες της γης και της σελήνης αντίστοιχα και R η απόσταση μεταξύ γης και σελήνης.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η σεληνιακή τροχιά είναι ο κύριος λόγος δημιουργίας του παλιρροϊκού φαινομένου. Στο σύστημα αναφοράς Γη-Σελήνη-Ήλιος, η γη με τη σελήνη έχουν το ίδιο κέντρο βάρους, το οποίο, λόγω της –κατά πολύ– μεγαλύτερης μάζας της γης (συγκριτικά με αυτής της σελήνης), βρίσκεται εντός της γης. Γύρω από αυτό το κέντρο βάρους, αναπτύσσεται η αλληλεπίδραση μεταξύ γης και σελήνης. Εάν η γη αποτελείτο πλήρως από νερό, τότε θα σχηματιζόταν μία ελλειψοειδής μορφή (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα) του φαινομένου, λόγω των ελκτικών δυνάμεων που ασκεί η σελήνη στις γήινες υδάτινες μάζες. Εφόσον, όμως η γη δεν αποτελείται εξ ολοκλήρου από νερό και οι υδροφόροι ορίζοντες δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στον πλανήτη κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και το φαινόμενο παρατηρείται σε πολύ «ηπιότερες» καταστάσεις.



Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της παλίρροιας.

Πηγή: <http://wwwphys.murdoch.edu.au/rise/reslab/resfiles/tidal>

Η πρώτη εξίσωση που χρειαζόμαστε για την ανάλυση ρευστοδυναμικών μηχανών, όπως οι υδροστρόβιλοι που μελετάμε στην παρούσα εργασία, είναι η εξίσωση της συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.2)$$

Το ρευστό με το οποίο ασχολούμαστε είναι το νερό, το οποίο για τις εφαρμογές που μελετάμε, είναι ασυμπίεστο, καθώς η πυκνότητά του δεν είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, άρα ισχύει:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \text{ οπότε } \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \Rightarrow \rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \Rightarrow (\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (3.3)$$

Συνεπώς, επιλύοντας τη σχέση διανυσματικά, προκύπτει: $\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$ όπου ο δείκτης $k = 1, 2, 3$

και αναφέρεται στις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και των συντεταγμένων. Αυτό σημαίνει ότι η όποια μεταβολή της ταχύτητας είναι ανεξάρτητη των διάφορων διευθύνσεων.

Σύμφωνα με τον νόμο του Bernoulli, ισχύει:

$$p + \rho \frac{u^2}{2} + \rho g z = \text{σταθερό} \quad (3.4)$$

όπου για ρευστομηχανικές εφαρμογές (κυρίως υδραυλικές), η σχέση αυτή τροποποιείται στην παρακάτω:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z = \text{σταθερό} = H \quad (3.5)$$

όπου H είναι το ολικό ύψος (φορτίο) και οι υπόλοιποι όροι στο αριστερό σκέλος είναι:

$\frac{p}{\rho g}$: ύψος (φορτίο) ενέργειας υδροστατικής πίεσης

$\frac{u^2}{2g}$: ύψος (φορτίο) κινητικής ενέργειας

z : ύψος θέσης

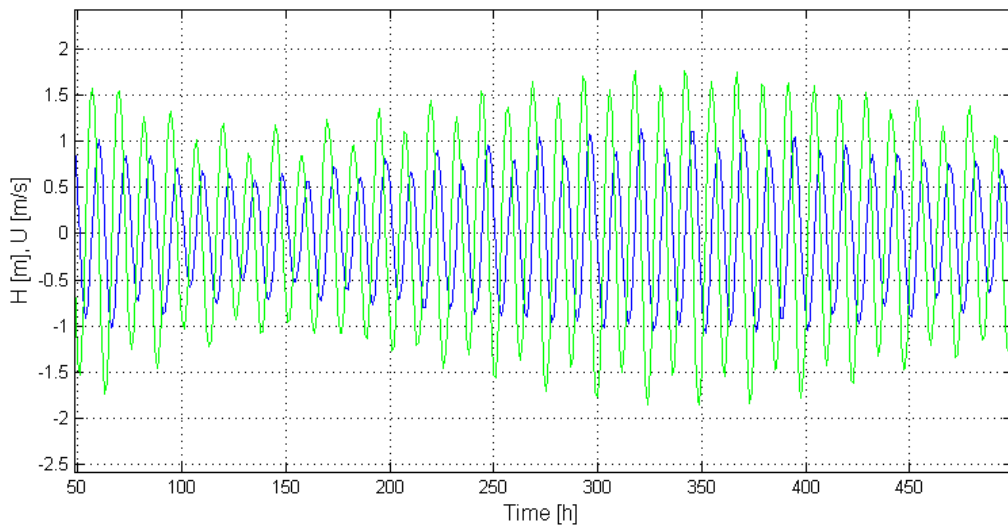
Οι παλίρροιες μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ημιτονοειδείς ταλαντώσεις. Η αρχή της ανάλυσης του φαινομένου είναι ότι η ταλάντωση της παλίρροιας μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους ημιτονοειδείς συναρτήσεις, οι οποίες εκφράζουν τις επιμέρους συνιστώσες του φαινομένου. Κάθε επιμέρους ταλάντωση ορίζεται από την περίοδο της (T_{tide}) καθώς και από τη γωνιακή της ταχύτητα $\omega_{\text{tide}} = 360^\circ / T_{\text{tide}}(\text{degrees/hour})$ (Dalhaug, 2011). Το

ύψος και η φάση κάθε επιμέρους ταλάντωσης πρέπει να ορίζονται καθώς η παλίρροια μπορεί να εκφραστεί στο σύνολό της από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$H = \sum H_i \cdot \cos(\omega_{tide,i} \cdot t + p_i) \text{ (m)} \quad (3.6)$$

$$U = \sum U_i \cdot \cos(\omega_{tide,i} \cdot t + p_i) \text{ (m/s)} \quad (3.7)$$

όπου H είναι το συνολικό ύψος της παλίρροιας και U η συνολική ταχύτητα του παλιρροϊκού ρεύματος, εξαρτώμενα από τις επιμέρους περιόδους ($\omega_{tide,i}$ σε deg/h), φάσεις (p_i σε deg), ταχύτητες (U_i σε m/s) και ύψη (H_i σε m). Το ύψος της παλίρροιας έχει πάντα διαφορά φάσης 90° με την ταχύτητα (όπως φαίνεται στην κάτωθι εικόνα), κάτι που σημαίνει ότι η ταχύτητα είναι μηδενική στο μέσο της μετάβασης από άμπωτη σε πλημμυρίδα και το αντίστροφο (Saeterstad, 2011).

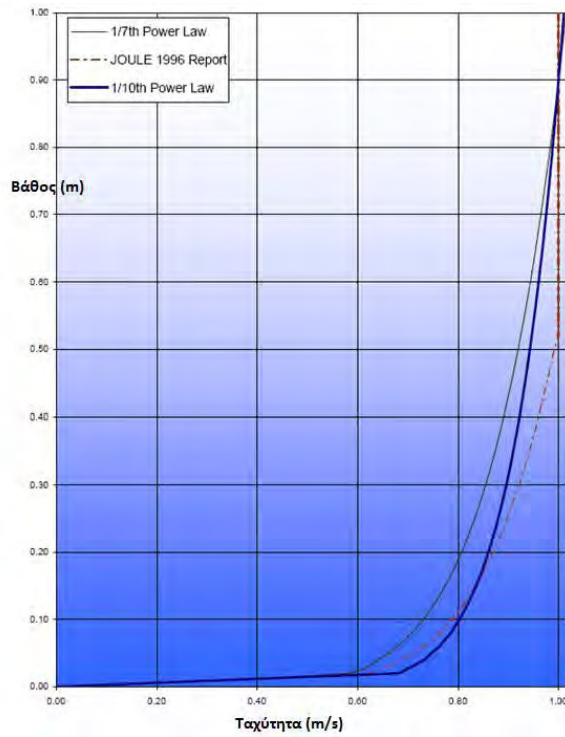


Εικόνα 3.2: Διάγραμμα παλιρροϊκού ύψους και ταχύτητας ρεύματος ως συνάρτηση του χρόνου, όπου είναι εμφανής η ημιτονοειδής συμπεριφορά του φαινομένου. (Saeterstad, 2011)

Η γενική εκθετική συνάρτηση για κατακόρυφες κατανομές ταχύτητας, οριζόντιας ροής, κοντά σε ένα στερεό όριο, όπως είναι ο πυθμένας, μπορεί να προσεγγιστεί ως (Κονδύλης, 2013):

$$u(z) = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/10} \text{ (m/s)} \quad (3.8)$$

όπου $u(z)$ είναι η οριζόντια ταχύτητα σε ένα βάθος z , u_0 είναι η ταχύτητα αναφοράς σε ένα βάθος αναφοράς (z_0). Το βάθος μετριέται από τον πυθμένα, άρα, έχουμε στον πυθμένα $z = 0$. Βασισμένοι στη δύναμη $1/10$ για την εκθετική συνάρτηση της ταχύτητας, υπολογίζουμε τη μέση –κατά βάθος- τιμή της ταχύτητας του ρεύματος:



Εικόνα 3.3: Γραφική απεικόνιση του προφίλ ταχυτήτων ενός παλιρροϊκού ρεύματος ως συνάρτηση του βαθομετρικού ύψους. (Κονδύλης, 2013)

$$\bar{u}^3 = \frac{\int_{h_1}^{h_2} u^3 dz}{\int_{h_1}^{h_2} dz} = \frac{\int_{h_1}^{h_2} u_0^3 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{3/10} dz}{\int_{h_1}^{h_2} dz} = \frac{u_0^3 \left(\frac{1}{z_0}\right)^{3/10}}{h_2 - h_1} \left(\frac{10}{13}\right) (h_2^{13/10} - h_1^{13/10}) \quad (3.9)$$

όπου h_2 = συνολικό βάθος (D), $h_1 = 0$, z_0 = βάθος αναφοράς. Σε πληθώρα τέτοιων εφαρμογών, το βάθος αναφοράς είναι και το συνολικό, έχουμε δηλαδή $D = z_0$. Άρα, η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$\bar{u} = \frac{u_0 \left(\frac{1}{D}\right)^{1/10}}{D} \left(\frac{10}{11}\right) (D^{11/10} - D^{11/10}) = \frac{10}{11} u_0 = 0.909 u_0 \quad (3.10)$$

Προκύπτει δηλαδή, ότι η μέση ταχύτητα του ρεύματος είναι το 90.9% της επιφανειακής του ταχύτητας. Ομοίως, υπολογίζουμε και την πυκνότητα ισχύος του ρεύματος, η οποία είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας ροής. Άρα, υπολογίζουμε τη μέση τιμή της ταχύτητας στον κύβο.

$$\begin{aligned} \bar{u}^3 &= \frac{\int_{h_1}^{h_2} u^3 dz}{\int_{h_1}^{h_2} dz} = \frac{\int_{h_1}^{h_2} u_0^3 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{3/10} dz}{\int_{h_1}^{h_2} dz} = \frac{u_0^3 \left(\frac{1}{z_0}\right)^{3/10}}{h_2 - h_1} \left(\frac{10}{13}\right) (h_2^{13/10} - h_1^{13/10}) \\ &= \frac{10}{13} u_0^3 = 0.769 u_0^3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Προκύπτει, λοιπόν, ότι η μέση πυκνότητα ισχύος ανά βάθος είναι ίση με το 76.9% της μέσης επιφανειακής πυκνότητας

Η ισχύς που μεταφέρει ένα θαλάσσιο ρεύμα ισούται με

$$P = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.12)$$

και δεδομένου ότι $m = \rho VA$ έχουμε ότι

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3.13)$$

όπου m είναι η μαζική ροή του ρεύματος σε kg/s , ρ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού σε kg/m^3 , A η επιφάνεια δια μέσου της οποίας περνά η ροή σε m^2 και V η ταχύτητα του ρεύματος σε m/s . Λόγω του ότι η ταχύτητα του ρεύματος δεν είναι σταθερή παντού όπως αναλύσαμε προωτέρα, η ταχύτητα V είναι συνήθως μία μέση τιμή της ταχύτητας (όπως αυτή που υπολογίσαμε) ανάλογα την εφαρμογή και το βάθος. Η επιφάνεια A συμβολίζει είτε την επιφάνεια εκμετάλλευσης όπου είναι η διατομή ενός αγωγού ή του ρότορα μίας υδρογεννήτριας είτε το εύρος της ροής (του καναλιού ή του ρεύματος) που μελετάμε.

Οι ταχύτητες των εκμεταλλεύσιμων παλιρροϊκών ρευμάτων συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 2 με 3 m/s (**Bahaj&Myers, 2003**) κάτι που αξίζει να μελετηθεί ως εξής: Ένα αέριο ρεύμα, το οποίο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, λειτουργεί σε μέγιστη ταχύτητα περί των 20 m/s , άρα για την ίδια επιφάνεια ρεύματος A , συγκρίνουμε τα μεγέθη ρV^3 ανάλογα των οποίων είναι η παραγόμενη ισχύς. Η πυκνότητα του αέρα είναι $\rho_2=1.2 \text{ kg/m}^3$ ενώ του θαλασσινού νερού $\rho_1=1020 \text{ kg/m}^3$. Έστω λοιπόν πως έχουμε δύο τυπικές ταχύτητες θαλάσσιου και αέριου ρεύματος $V_1=2.5 \text{ m/s}$ και $V_2=15 \text{ m/s}$.

$$\frac{\rho_1 V_1^3}{\rho_2 V_2^3} = \frac{1020 \times 2.5^3}{1.2 \times 15^3} = 3.935 \approx 4 \quad (3.14)$$

το οποίο σημαίνει ότι για δύο τυπικά ρεύματα αέρα και παλίρροιας, το δεύτερο ενδέχεται να είναι έως και 4 φορές αποδοτικότερο. Αυτός είναι και ένας λόγος όπου τα τελευταία χρόνια, η εκμετάλλευση των παλιρροϊκών ρευμάτων έχει γίνει συστηματικότερη.

Μία παλαιότερη μελέτη σε 106 τοποθεσίες εντός των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έδειξε ότι από αυτά τα σημεία θα μπορούσε να παραχθούν και να διανεμηθούν 50 TWh σε διάστημα ενός έτους (**Bahaj&Myers, 2003**). Καναδικές μελέτες αναφέρουν ότι εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος 50 GW είναι εφικτό να υπάρξουν σε ένα σημαντικό κομμάτι της βόρειας ακτογραμμής της χώρας. Πολύ καλή προοπτική παρουσιάζει και η Ρωσία, όπου έχει τη δυνατότητα να παράγει 110 GW από εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της παλίρροιας με τα 20 εξ αυτών να μπορούν να παραχθούν στο δέλτα του ποταμού Μεζέν (Mezenriver) στα βόρεια της χώρας.

Επίσης, μεγάλη σημασία παρουσιάζουν περιοχές του Ινδικού, όπως η περιοχή Κουτς στην οποία θα μπορούσαν να δημιουργηθούν εγκαταστάσεις ισχύος 8 GW. Αυτή τη στιγμή, η Βρετανία παρουσιάζει σε παγκόσμιο επίπεδο τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στον τομέα της παλιρροϊκής εκμετάλλευσης, παράγοντας (στην υφαλοκρηπίδα της) ετησίως γύρω στις 20 TWh, κάτι που αντιστοιχεί στο 10-15% της ετήσιας παγκόσμιας παλιρροϊκής παραγωγής. Μελέτες δείχνουν ότι η Βρετανία θα μπορούσε να καλύψει το 20% των αναγκών της σε ηλεκτρισμό από τέτοιου είδους εγκαταστάσεις (**Nichols-Lee, 2011**).

Άλλες περιοχές στον κόσμο όπου παρουσιάζουν σημαντική προοπτική λόγω της παλιρροϊκής τους δραστηριότητας είναι ο Αμαζόνιος, ο Πορθμός του Μαγγελάνου, ο Κόλπος του Μεξικό, η Βόρεια Θάλασσα κ.ά.



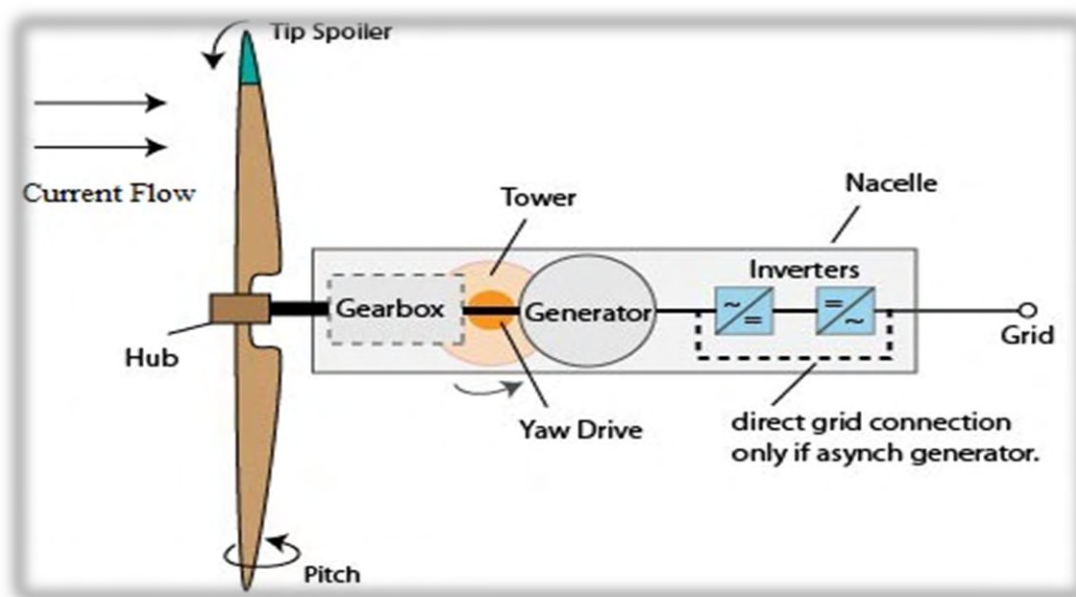
Εικόνα 3.4: Με μπλε περίγραμμα φαίνονται, στον παγκόσμιο χάρτη, γεωγραφικά σημεία με αξιοποιήσιμη θαλάσσια παλιρροϊκή δραστηριότητα. Πηγή: (Nichols-Lee, 2011)

Κεφάλαιο 4. Λειτουργία των παλιρροϊκών στροβίλων

4.1 Τα λειτουργικά μέρη ενός στροβίλου και η αποδοτικότητά του

Η δομή μίας παλιρροϊκής τουρμπίνας (υδατογεννήτριας) αποτελείται από τα παρακάτω μέρη: Ένας υδροστρόβιλος περιστρέφεται από τα θαλάσσια ρεύματα, παράγοντας μηχανική ενέργεια.

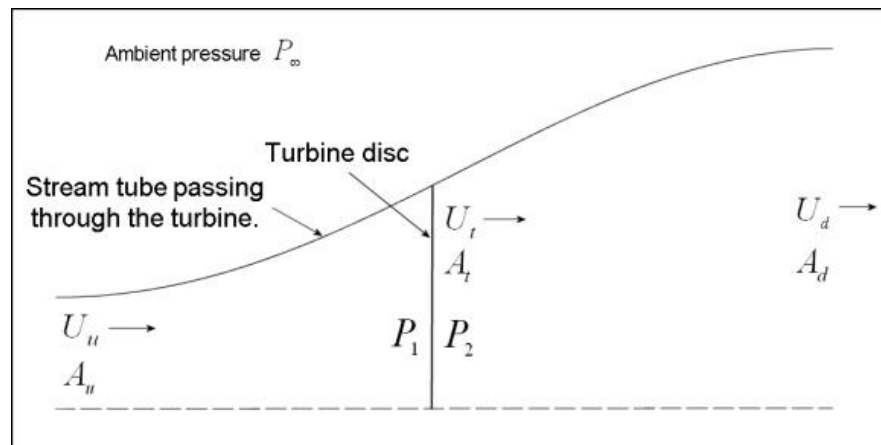
- ❑ Μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων, η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται στη γεννήτρια.
- ❑ Στη γεννήτρια η μηχανική ενέργεια δίνει κίνηση σε ένα ρότορα ο οποίος περιστρέφεται εντός ενός στάτη. Έτσι μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- ❑ Έπειτα, το ρεύμα περνά από τους κατάλληλους μετατροπείς, οι οποίοι το μετατρέπουν από συνεχές σε εναλλασσόμενο.
- ❑ Τέλος, με την κατάλληλη καλωδίωση (τριφασική) το ρεύμα μεταφέρεται στην ακτή ή οπουδήποτε αλλού.



Εικόνα 4.1: Σχεδιάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται εκτενώς η δομή και λειτουργία ενός παλιρροϊκού υδροστροβίλου. Πηγή: <https://www.mtholyoke.edu/~walch201/classweb/wp/images/diagramofturbine.jpg>

Το ποσό διαθέσιμης ισχύος που μεταφέρει ένα παλιρροϊκό ρεύμα δεν μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως, καθώς δε γίνεται να μηδενίσουμε τις μηχανικές απώλειες λόγω τριβών, τύρβης και άλλων φυσικών φαινομένων που παρουσιάζονται καθώς το ρευστό περνά δια μέσου της υδατογεννήτριας. Με άλλα λόγια, υπάρχει ένας συντελεστής απόδοσης που καθορίζει το ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος όπου είναι εκμεταλλεύσιμο.

Αυτός ο συντελεστής συμβολίζεται με C_p . Η βελτιστοποίηση της απόδοσης είναι μείζονος σημασίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή μίας υδατογεννήτριας, όντας πάντα σε συνδυασμό με τις εκάστοτε οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Για την εξαγωγή του μέγιστου βαθμού απόδοσης (ως μία πρώτη ένδειξη αυτών των μεγεθών), πράττουμε ως εξής: Αρχικά, μελετάται ένας όγκος ελέγχου ο οποίος εσωκλείει μία αξονική υδατογεννήτρια, όπως αυτός φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης της ροής του νερού δια μέσω μίας παλιρροϊκής τουρμπίνας.
 Πηγή: [http://www.wind-power-program.com/Images/betz.htm/turbinedisc\(580x291\).jpg](http://www.wind-power-program.com/Images/betz.htm/turbinedisc(580x291).jpg)

Με τα γράμματα U,A,P συμβολίζονται οι ταχύτητες, οι επιφάνειες δια μέσου των οποίων περνά το νερό και οι πιέσεις αντίστοιχα. Με το δείκτη u αναφέρονται τα παραπάνω μεγέθη πριν την είσοδό τους στις πτερωτές του ρότορα, με t αναφέρονται τα μεγέθη πάνω στο ρότορα, ενώ με d αναφέρονται τα μεγέθη αρκετά μετά την έξοδό τους από το ρότορα. Με p_∞ συμβολίζεται η περιβάλλουσα πίεση όπου έχει το ρευστό, ενώ p_1 και p_2 είναι οι πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο από το ρότορα αντίστοιχα. Η παραγόμενη ισχύς του υδατοστροβίλου είναι $P=(p_1-p_2)A_tU_t$, όπου η ογκομετρική παροχή του ρεύματος θεωρείται σταθερή ($U_uA_u=U_tA_t=U_dA_d$). Από την αρχή διατήρησης της ορμής προκύπτει:

$$(p_1 - p_2)A_t = (\text{μαζική παροχή}) \times (\text{διαφορά ταχύτητας}) = \rho A_u U_u (U_u - U_d)$$

Αν εφαρμόσουμε την αρχή του Bernoulli κάνοντας ισοζύγια για την είσοδο και την έξοδο του ρεύματος, έχουμε:

$$P_{\infty} + \rho \frac{u_u^2}{2} = P_1 + \rho \frac{u_t^2}{2}$$

$$P_{\infty} + \rho \frac{u_d^2}{2} = P_2 + \rho \frac{u_t^2}{2}$$

Άρα, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

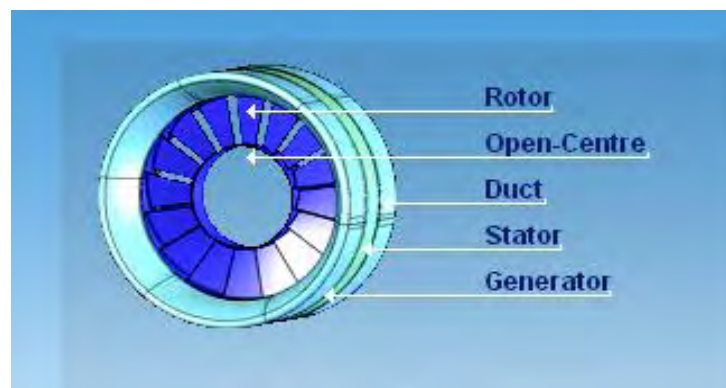
$$(P_1 - P_2) = \frac{\rho}{2}(U_u^2 - U_d^2) = \rho \frac{A_u}{A_t} U_u (U_u - U_d) = \rho U_t (U_u - U_d)$$

και δεδομένου ότι $U_t = \frac{U_u + U_d}{2}$ από όλες τις αναφερθείσες εξισώσεις, εξάγουμε την

$$\text{ακόλουθη σχέση για την απόδοση } C_p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{U_d}{U_u}\right) \left(1 + \frac{U_d}{U_u}\right)^2.$$

Προκειμένου να βρούμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση, πρέπει $dC_p / dU_t = 0$. Συνεπώς, το συμπέρασμα είναι ότι η μέγιστη απόδοση παρουσιάζεται όταν $U_d / U_u = 1/3$ και $C_p = 16/27 \approx 59.3\%$.

Το 59.3% είναι η μέγιστη απόδοση που μπορεί να παραγάγει μία γεννήτρια και η τιμή αυτή λέγεται *όριο Betz* προς τιμή του Γερμανού μηχανικού Albert Betz, ο οποίος έκανε μελέτες πάνω στις ανεμογεννήτριες και ήταν ο πρώτος που μελέτησε αυτήν την απόδειξη. Πάνω σε αυτή την απόδειξη βασίζεται κατά βάση ο σχεδιασμός των παλιρροϊκών στροβίλων, παρά το ότι έχουν αναπτυχθεί είδη στροβίλων για τα οποία γίνεται λόγος ότι υπερβαίνεται το όριο Betz, όπως η γεννήτρια OpenCenter της ιρλανδικής εταιρίας OpenHydro.

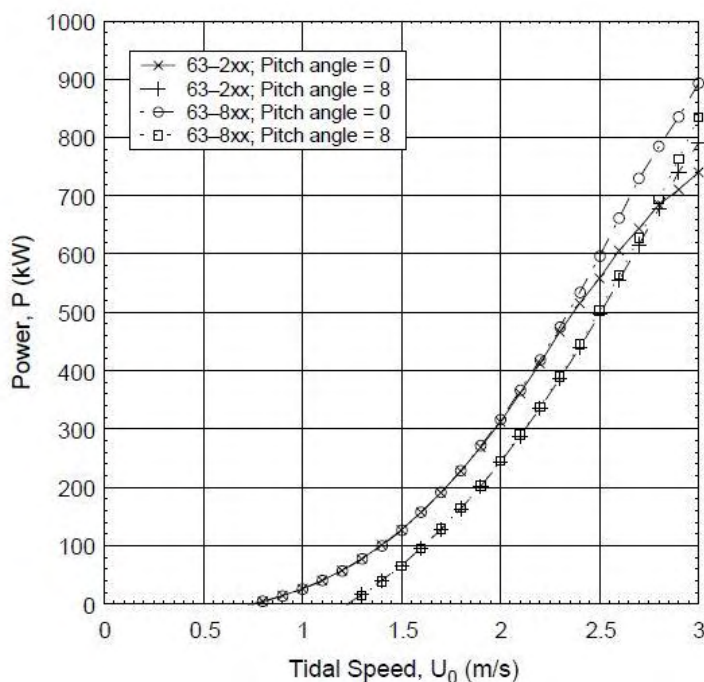


Εικόνα 4.3: Σχεδιάγραμμα του υδροστροβίλου OpenCenter στο οποίο φαίνονται τα δομικά του μέρη.
Πηγή: <http://www.cantickhead.com/open%20centre%20turbine.png>

Πέραν του ενεργειακού βαθμού απόδοσης, υπάρχουν ο βαθμός ηλεκτρικής και μηχανικής απόδοσης και συμβολίζονται με n_e και n_m αντίστοιχα. Ο πρώτος σχετίζεται με τις απώλειες των ηλεκτρικών συνδέσεων και δικτύου, ενώ ο δεύτερος έγκειται στις μηχανικές απώλειες του κιβωτίου ταχυτήτων όπου περιέχει τα γρανάζια και εκεί γίνεται η μετάδοση της κίνησης. Ως αποτέλεσμα, η ισχύς που αποδίδεται είναι εν τέλει, συμπεριλαμβάνοντας τις όποιες απώλειες (Nichols-Lee, 2011):

$$P_{abs} = \frac{1}{2} c_p n_e n_m \rho A V^3$$

Επίσης, οι παλιρροϊκοί υδροστρόβιλοι, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λειτουργούν σε ταχύτητες ρεύματος μεταξύ 1.2 και 3 m/s. Σε ταχύτητες μικρότερες των 1.2 m/s, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μηδαμινή και ασύμφορη ενώ σε ταχύτητες άνω των 3 m/s τα ασκούμενα στη στροβιλομηχανή τασικά φορτία είναι πολύ μεγάλα επιβαρύνοντας τη συσκευή με υψηλά μεγέθη κόπωσης. (Batten&Molland, 2006)



Εικόνα 4.4: Τυπικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η ισχύς ενός παλιρροϊκού στροβίλου συναρτήσει της ταχύτητας ρεύματος. (Batten & Molland, 2006)

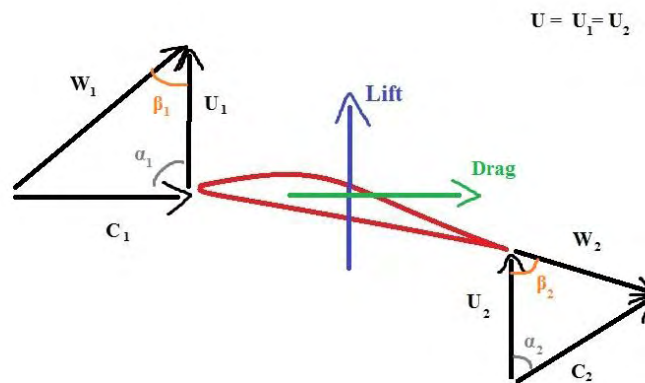
Προχωρώντας σε μία ευρύτερη ανάλυση των συγκεκριμένων υδροστρόβιλων αξίζει να αναφερθούν κάποιες θεμελιώδεις έννοιες. Καταρχάς, είναι υδραυλικές ρευστοδυναμικές μηχανές με το εργαζόμενο μέσο να είναι ασυμπίεστο καθώς δεν

υφίσταται διαφοροποίηση η πυκνότητά του κατά την έξοδο από τον στρόβιλο. Οι συσκευές που έχουν αναπτυχθεί είναι κατά βάση μονοβάθμιες καθώς δεν παρατηρούμε την ύπαρξη πολλαπλών βαθμίδων με πτερύγια. Επίσης, συναντώνται στρόβιλοι κυρίως αξονικής αλλά και ακτινικής ροής ενώ σε άλλους υπάρχει η παρουσία εξωτερικού κελύφους ενώ σε άλλους όχι.

Προκειμένου να γίνει μία δομημένη παρουσίαση των παλιρροϊκών στρόβιλων, πρέπει να υπάρχει μία ταξινόμηση. Τα κύρια κριτήρια διαχωρισμού είναι πολλά και ποικίλα, ωστόσο εν προκειμένω το μόνο κριτήριο θα είναι η διεύθυνση ροής του εργαζόμενου μέσου δηλαδή του νερού. Με άλλα λόγια, ο διαχωρισμός θα έγκειται ανάμεσα στους αξονικούς και τους ακτινικούς στρόβιλους. Αξονικοί είναι οι στρόβιλοι όπου το μέσο έχει μία διεύθυνση ροής παράλληλη στον άξονα περιστροφής ενώ ακτινικοί είναι αυτοί όπου το μέσο εισέρχεται στην τουρμπίνα στη διεύθυνση της ακτίνας της.

4.1. Αξονικοί στρόβιλοι

Όπως είναι γνωστό από τον κλάδο των στοβιλομηχανών, όταν ένα ρευστό εισέρχεται σε μία τουρμπίνα η κατεύθυνση της ροής του μεταβάλλεται από τα πτερύγια του δρομέα. Έτσι υπάρχει διαφορετική ταχύτητα (ως προς το μέτρο και τη διεύθυνση) στην είσοδο από ότι στην έξοδο. Δημιουργούνται έτσι τα λεγόμενα τρίγωνα ταχυτήτων.



Εικόνα 4.5: Σχεδιάγραμμα τριγώνων ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο του νερού από το δρομέα, όπως αυτό σχηματίζεται παρατηρώντας τη ροή από το πλάι της τουρμπίνας.

Στην παρακάτω εικόνα γίνεται εμφανές το πως αλλάζει η ροή του ρευστού καθώς διαρρέει το πτερύγιο του δρομέα. Με το δείκτη 1 συμβολίζεται η είσοδος του νερού στο

δρομέα ενώ με το δείκτη 2 η έξοδος. Με τα γράμματα U, C και W συμβολίζονται η περιφερειακή, η απόλυτη και η σχετική ταχύτητα του νερού αντίστοιχα. Περιφερειακή είναι η ταχύτητα του δρομέα, η οποία είναι σταθερή καθ' όλο το πλάτος των πτερυγίων του δρομέα, αποτελεί συνάρτηση της ακτίνας r (η απόσταση από το κέντρο του δρομέα) και ισούται με $U=U_1=U_2= \omega \cdot r$, όπου ω : η γωνιακή ταχύτητα του στρόβιλου (rad/s). Σχετική ταχύτητα είναι η ταχύτητα που οφείλεται στη μεταβολή που αποκτά η ροή λόγω της περιστροφής των πτερυγίων ενώ απόλυτη ταχύτητα είναι το ανυσματικό άθροισμα της σχετικής και της περιφερειακής. Η μεταβολή της ροής είναι εμφανής από τις γωνίες εισόδου και πτερυγίου όπου συμβολίζονται με α και β έκαστος. Με βάση όλα τα παραπάνω στοιχεία καταλήγουμε στο ότι η παραχθείσα μηχανική ισχύς μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει όλων αυτών των μεγεθών ως:

$$P = m \cdot (c_2 \cdot \sin \alpha_2 - c_1) \quad [\text{Watt}]$$

όπου με m συμβολίζεται η μαζική παροχή στο στρόβιλο του εργαζόμενου μέσου.

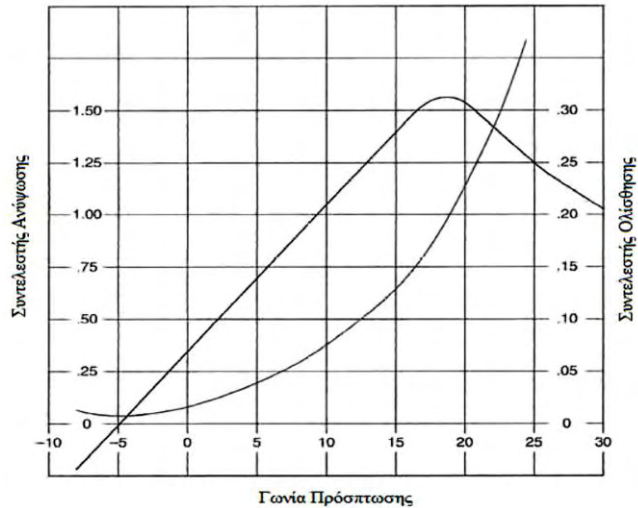
Καθώς η ροή διέρχεται από τα πτερύγια του δρομέα ασκούνται σε καθένα εξ αυτών δύο δυνάμεις. Αυτές είναι η άνωση και η οπισθέλκουσα δύναμη. Η οπισθέλκουσα είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο από τη ροή του ρευστού, με διεύθυνση παράλληλη της ροής, η οποία ορίζεται ως

$$Drag = \frac{1}{2} C_D \rho u_\infty^2 S$$

Παρόμοια, η υδροδυναμική άνωση είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο από τη ροή του ρευστού, με διεύθυνση κάθετη της ροής, και δημιουργεί έτσι την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων λόγω της ανύψωσης στην οποία τα ωθεί. Η άνωση ορίζεται ως

$$Lift = \frac{1}{2} C_L \rho u_\infty^2 S \quad (\text{Κονδύλης, 2013})$$

Με το γράμμα S ορίζεται η επιφάνεια του πτερυγίου ενώ με τα σύμβολα C_D, C_L οι συντελεστές οπισθέλκουσας και ανωστικής δύναμης αντίστοιχα, οι οποίες μετρώνται σε Newtons (N). Οι παραπάνω συντελεστές μεταβάλλονται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.6: Μεταβολή των συντελεστών C_L και C_D σε συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης. (Κονδύλης, 2013)

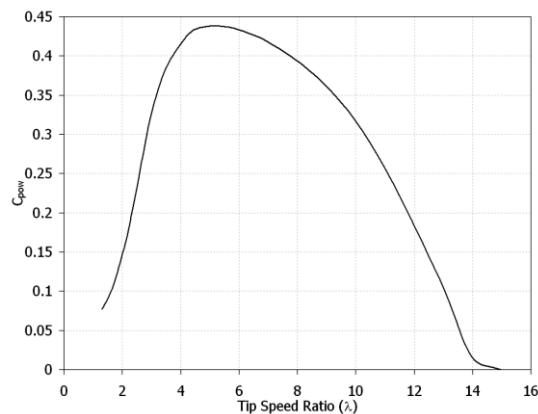
Κάθε σημείο των πτερυγίων του δρομέα κινείται με γωνιακή ταχύτητα ω και σε απόσταση r από το κέντρο του δρομέα έχει ταχύτητα περιστροφής ωr . Σα λόγος ταχύτητας ορίζεται η ποσότητα

$$\lambda = \frac{\omega r}{U_\infty}$$

Στο άκρο της πτερωτής, ο λόγος γίνεται μέγιστος και ισούται με

$$\lambda_0 = \frac{\omega R}{U_\infty}$$

όπου R είναι η ακτίνα του ρότορα. Σύμφωνα με μελέτες, μία παλιρροϊκή τουρμπίνα αποδίδει τη μέγιστη ισχύ της για $\lambda_0=5$, κάτι που συνεπάγεται πως ένας κατάλληλος σχεδιασμός συμπεριλαμβάνει την επίτευξη ενός λόγου γύρω από αυτήν την τιμή (Abu-Shark, 2002).



Εικόνα 4.7: Τυπικό διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης C_p από το λόγο ταχύτητας άκρου λ_0 . (Abu-Shark, 2002)

Κατά τη λειτουργία μίας τέτοιας γεννήτριας, ασκούνται πάνω σε αυτή μία αξονική δύναμη F (N) καθώς και μία στρεπτική ροπή T (Nm). Εξ αυτών προκύπτει πως η παραχθείσα μηχανική ισχύς ισούται με $P=T\omega$ και μπορούν να ορισθούν οι αντίστοιχοι αδιάστατοι συντελεστές

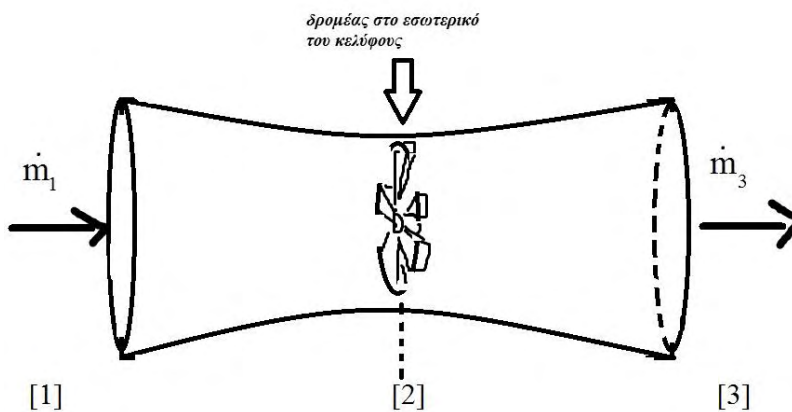
$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 AR}$$

ενώ ο βαθμός απόδοσης μπορεί να οριστεί ως $C_p = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A} = \lambda_0 C_T$

(Σταπουντζής, 2013)

Αρχικά, η κυρίαρχη αντίληψη ανάπτυξης τέτοιων συσκευών ήταν στα ίδια πρότυπα με της ανεμογεννήτριες. Για αυτόν το λόγο, ακόμα και σήμερα οι ανοιχτές τουρμπίνες με δύο ή τρία πτερύγια είναι αρκετά διαδεδομένες. Με την πάροδο των χρόνων έγινε πιο ευρεία η χρήση κελύφους, εντός του οποίου βρίσκεται ο δρομέας της τουρμπίνας. Κατά κύριο λόγο, η δομή των κελύφων που χρησιμοποιούνται έχουν τη δομή ακροφυσίου στην είσοδο και διαχύτη στην έξοδο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης ισχύος για λόγους που θα αναλυθούν εν συνεχεία.



Εικόνα 4.8: Σχεδιάγραμμα τυπικού παλιρροϊκού στροβίλου με κέλυφος όπου με τους δείκτες 1,2,3 συμβολίζονται τα δυναμικά μεγέθη της εισόδου στο ακροφύσιο, της εισόδου στο ρότορα και της εξόδου από το διαχύτη αντίστοιχα.

Καταρχάς, το σύστημα ενός **παλιπροϊκού** υδροστροβίλου είναι μόνιμης ροής, άρα η μαζική ροή παραμένει σταθερή. Οπότε, έχουμε ότι $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$ άρα ισχύει πως

$$\int_{A_1} \rho u_1 dA = \int_{A_2} \rho u_2 dA = \int_{A_3} \rho u_3 dA$$

όπου ρ : η πυκνότητα του μέσου, u : η επιμέρους ταχύτητά του και A : η διατομή διαμέσω της οποίας περνά το νερό.

Δεδομένου ότι η πυκνότητα παραμένει ασυμπίεστη καθώς η ροή είναι ασυμπίεστη, προκύπτει ότι $\rho u_1 A_1 = \rho u_2 A_2 = \rho u_3 A_3$. Απαλείφοντας τον όρο της πυκνότητας έχουμε την εξής σχέση: $u_1 A_1 = u_2 A_2 = u_3 A_3$

Από τη σχέση που προέκυψε συμπεραίνουμε τα εξής:

α) Η ταχύτητα του ρευστού, καθώς αυτό εισέρχεται στο ρότορα, αυξάνεται λόγω της μικρότερης διατομής που αποκτά η ροή ($u_2 > u_1$). Δεδομένου ότι η παραχθείσα ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας, με αυτόν τον τρόπο, παράγεται σε μικρότερο εύρος επιφάνειας μεγαλύτερη ισχύς.

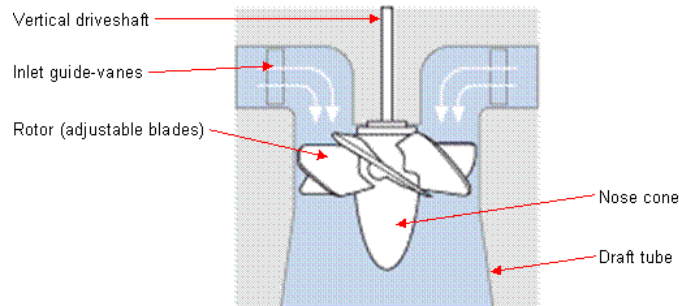
β) Καθώς το ρευστό εξέρχεται από το ρότορα, η διατομή της ροής αυξάνεται με αποτέλεσμα η ταχύτητα σε αυτή τη φάση να μειώνεται ($u_2 > u_3$). Πέραν από τους τύπους που ήδη ειπώθηκαν για την ισχύ, παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι η ισχύς είναι ίση με:

$$P = m \frac{u_1^2 - u_3^2}{2} \text{ (Dixon, 2005)}$$

Άρα, μείωση της ταχύτητας εξόδου από το κέλυφος συνεπάγεται μικρής αύξησης στην παραχθείσα μηχανική ισχύ. Επίσης, ένα μεγαλύτερο εύρος ροής είναι απαραίτητο στην έξοδο του ρευστού από το ρότορα της τουρμπίνας καθώς το απόρρεμα που δημιουργείται αποκτά μεγάλο εύρος λόγω των διάχυτων στροβιλισμών του. Συνεπώς, η ύπαρξη διαχύτη κρίνεται απαραίτητη διότι σε περίπτωση ανυπαρξίας της θα υπήρχαν προβλήματα σχηματισμού τύρβης και μεγαλύτερων τασικών φορτίων στη διάταξη της τουρμπίνας (Dixon, 2005).

Πάνω σε αυτή τη λογική κατασκευής αναπτύχθηκαν υδροστρόβιλοι όπως η τουρμπίνα Beluga 9 της εταιρίας Alstom ή η γεννήτρια LTT της εταιρίας Aquantis, οι οποίες έχουν εμπορική εφαρμογή τα τελευταία χρόνια σε πληθώρα σημείων στο Βόρειο Ατλαντικό ωκεανό και για τις οποίες θα γίνει εκτενής αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, δεν ήταν λίγες οι (πειραματικές τουλάχιστον) εφαρμογές στροβιλομηχανών τύπου Kaplan των οποίων η χρήση για παραγωγή έργου είναι ευρέως διαδεδομένη εδώ και δεκαετίες. Προκειμένου να υπάρξει μεγαλύτερη απόδοση μηχανικού έργου είναι

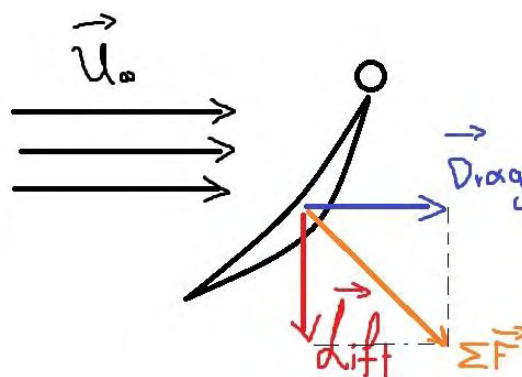
συνηθέστερο, τέτοιου είδους στρόβιλοι να υφίστανται εντός μεγαλύτερων σε διατομή αγωγών.



Εικόνα 4.9: Απεικόνιση τουρμπίνας τύπου Kaplan στην οποία παρουσιάζονται τα δομικά της μέρη.
Πηγή: <https://www.renewablesfirst.co.uk/wp-content/uploads/Kaplan-turbine-main-parts-diagram.gif>

4.2. Ακτινικοί στρόβιλοι

Η δομή λειτουργίας μίας ακτινικής στροβιλομηχανής τέτοιου τύπου είναι αρκετά απλούστερη συγκριτικά με μία αξονική. Συνήθως, η λειτουργία μίας ακτινικής συσκευής έγγειται στην οπισθέλκουσα δύναμη (drag) που ασκεί το ρευστό στην πτερωτή, καθώς η άνωση που δημιουργείται είναι συνήθως αρκετά μικρότερη. Ωστόσο, υπάρχουν και ακτινικές συσκευές όπου βασίζονται στην άνωση (lift).



Εικόνα 4.10: Απεικόνιση της δημιουργίας οπισθέλκουσας δύναμης και άνωσης πάνω σε ένα πτερόγιο ακτινικού στροβίλου

Στην Εικόνα 4.10 είναι εμφανές ότι η συνολική δύναμη που ασκείται στην πτερωτή είναι το ανυσματικό άθροισμα της οπισθέλκουσας και της ανωστικής δύναμης.

$$\vec{F}_{ολ} = \Sigma \vec{F} = \vec{Drag} + \vec{Lift} \text{ και το μέτρο της δύναμης είναι } F_{ολ} = \sqrt{Drag^2 + Lift^2}$$

Καθώς, η δύναμη που ασκείται συνήθως στην πτερωτή ενδέχεται να μην είναι παντού ομοιόμορφη και να διαφέρει ανάλογα την απόσταση r από το κέντρο του δρομέα, ισχύει ότι $F=F(r)$ και η συνολική ροπή που ασκείται στο περὺγιο του δρομέα και ευθύνεται για την περιστροφή του, ισούται με

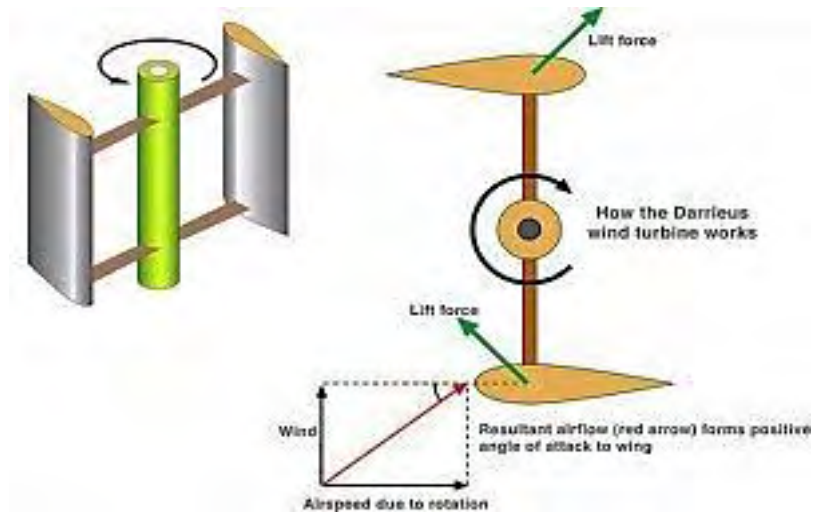
$$T = \int_{R_{hub}}^R F(r) \cdot dr$$

όπου με R_{hub} συμβολίζεται η απόσταση της αρχής της πτέρυγας (πλύμνη) από τον άξονα περιστροφής ενώ με R η αντίστοιχη του τέλους. Και όπως είναι γνωστό, η παραχθείσα μηχανική ισχύς ορίζεται ως $P=T \cdot \omega$.

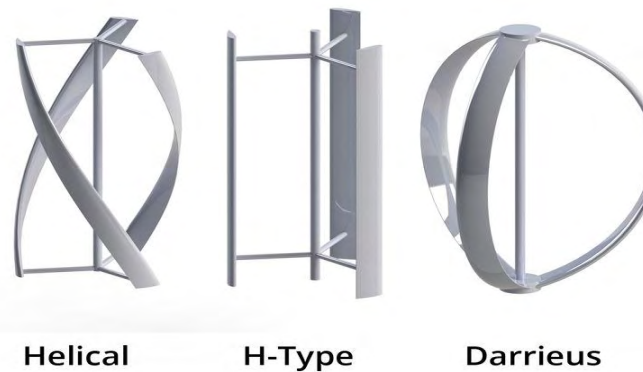
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δομή του στροβίλου Darrieus η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην άνωση και αποτέλεσε βάση αναφοράς για την ανάπτυξη στροβιλομηχανών παρόμοιας λειτουργίας όπως η ελικοειδής τουρμπίνα Gotlon εμπνευσμένη από το Ρώσο μηχανικό Α.Μ Γκορλόβ.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η ταχύτητα του ρεύματος σχηματίζει τρίγωνο ταχυτήτων με την ταχύτητα περιστροφής του περὺγιου και εισέρχεται σε αυτό με γωνία προσβολής α . Έτσι δημιουργείται ανωστική δύναμη με διεύθυνση κάθετη σε αυτή της εισερχόμενης ταχύτητας, με την περιστροφή να οφείλεται στη προβολή της άνωσης στη διεύθυνση της περιφέρειας της κυκλικής κίνησης που εκτελεί η πτερωτή. Η συγκεκριμένη συνιστώσα ορίζεται ως $L_\theta = Lift \cdot \sin \alpha$. Εκ τούτου προκύπτει ότι η παραχθείσα ροπή είναι $T = L_\theta \cdot R$ όπου με R συμβολίζεται η ακτίνα της στροβιλομηχανής και συνεπώς η παραχθείσα μηχανική ισχύς ισούται με $P = T \cdot \omega = (\omega \cdot R) \cdot L_\theta$

Η ιδιαιτερότητα αυτής της τουρμπίνας είναι η έντονη δημιουργία και παραμονή τύρβης και ροϊκού στροβιλισμού εντός της πτερωτής, κάτι που δημιουργεί συχνότητα μηχανικών απωλειών και χρήζει κατάλληλου σχεδιασμού για την ελαχιστοποίηση αυτών (Σταπουντζής, 2013).

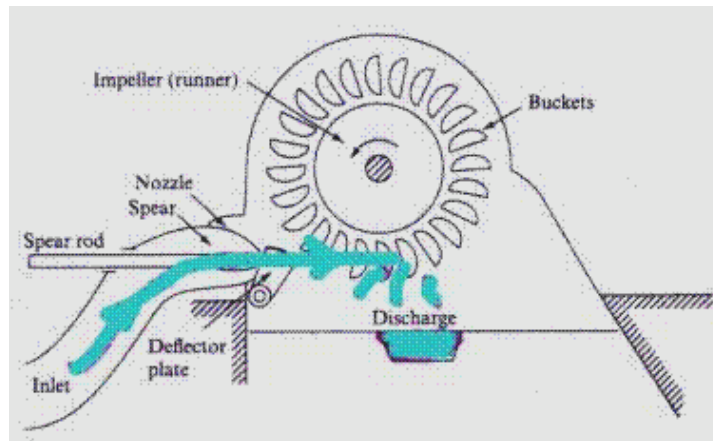


Εικόνα 4.11: Απεικόνιση ενός στροβίλου Darrieus όπου εξηγείται η λειτουργία του.
 Πηγή: <http://www.energybeta.com/wp-content/uploads/2009/06/conceptof-darrieuswindturbine-300x200.jpg>



Εικόνα 4.12: Απεικόνιση τριών διαφορετικών μορφών της τουρμπίνας Darrieus μεταξύ των οποίων και η τουρμπίνα Gorlon στα αριστερά. Πηγή: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR17Wm4Qg6gbCusjSUco8k7MIHTIZX0Q_kBSAJHj31G2ahMYjc1YZJ PpNg

Με βάση αυτή τη φιλοσοφία αναπτύχθηκαν τουρμπίνες για την εκμετάλλευση παλιρροϊκών ρευμάτων όπως οι στροβίλοι TidGen και RivGen της εταιρίας OPRC, για τους οποίους γίνεται λόγος σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, ακτινικοί στροβίλοι οι οποίοι θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή σε παλιρροϊκά ρεύματα είναι οι κλασσικοί τύποι των Francis και Pelton. Ωστόσο, λόγω του ότι η διεύθυνση ροής σε στροβίλους τέτοιων τύπων πρέπει να είναι συγκεκριμένης διεύθυνσης, παροχής και ταχύτητας η χρησιμοποίησή τους προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ευρύτερου δομικού πλαισίου αγωγών και ενδεχομένως αντλιών και αυτό τους κάνει λιγότερο επιθυμητούς.



Εικόνα 4.13: Απεικόνιση της δομής και λειτουργίας ενός ακτινικού στροβίλου τύπου Pelton.

Πηγή: [https://encrypted-](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR4qVhaXAQBNj5e3XW9f8xPEHouMt9wj1kK7Nsx6BFkwIbYySANAGVMwESM)

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR4qVhaXAQBNj5e3XW9f8xPEHouMt9wj1kK7Nsx6BFkwIbYySANAGVMwESM](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR4qVhaXAQBNj5e3XW9f8xPEHouMt9wj1kK7Nsx6BFkwIbYySANAGVMwESM)

4.3. Μοντέλο ανάλυσης κόστους παραγωγής ενέργειας

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό της εγκατάστασης ενός παλιρροϊκού υδροστροβίλου αποτελεί η ετήσια παραχθείσα ενέργεια καθώς βάσει αυτής καθορίζονται τα απαιτούμενα οικονομικά μεγέθη. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένας παλιρροϊκός υδροστροβίλος λειτουργεί σε ταχύτητες ρευμάτων μεταξύ 1 με 3 m/s. Συνήθως, σε αυτό το εύρος τιμών ορίζεται η λειτουργία του καθώς σε ταχύτητες κάτω από 1 m/s η παραγωγή ηλεκτρισμού κρίνεται οικονομικά ασύμφορη και σε ταχύτητες άνω των 3 m/s τα αναπτυσσόμενα τασικά φορτία είναι μεγάλα ενώ η παραχθείσα ισχύς μειώνεται αισθητά. Έτσι, υπάρχει για αυτές τις υδροτουρμπίνες ένα άνω και ένα κάτω όριο λειτουργίας. Το κάτω όριο λειτουργίας ονομάζεται V_{CUT-IN} και θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια. Επίσης, συνήθως ορίζεται ως ταχύτητα σχεδιασμού μίας τέτοιας τουρμπίνας η μέση ταχύτητα ρεύματος V_{AVG} , ενώ η μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα ρεύματος συμβολίζονται V_{max} και V_{min} , αντίστοιχα. Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι η ταχύτητα ενός παλιρροϊκού ρεύματος για κάθε χρονική στιγμή ορίζεται ως:

$$V(t) = \left[V_{max} \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi}{T_{lunar}}\right) + V_{min} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{T_{lunar}}\right) \right] \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{m/s}) \quad (\text{Saeterstad, 2011})$$

όπου $T_{\text{lunar}}=29$ ημέρες, 12 ώρες και 44 λεπτά.

(ο χρόνος περιστροφής της σελήνης γύρω από τη γη)

Ακολουθώς, βάσει του τύπου της ταχύτητας, προκύπτει ότι η παραχθείσα ισχύς ορίζεται ως εξής:

Εάν $V(t) \leq V_{\text{CUT-IN}}$ τότε η παραχθείσα ισχύς είναι μηδενική ($P=0$).

Εάν $V_{\text{CUT-IN}} \leq V(t) \leq V_{\text{AVG}}$ τότε η παραχθείσα ισχύς είναι $P=0.5\rho AV^3(t)$.

Εάν $V_{\text{AVG}} \leq V(t)$ τότε η παραχθείσα ισχύς είναι $P=0.5\rho AV_{\text{AVG}}^3$

Επομένως, η ετήσια συνολική ενέργεια που έχει παραχθεί είναι:

$E_{\text{annual}}=K \cdot E_{\text{cycle}}$, όπου K είναι ο αριθμός παλιρροϊκών κύκλων ανά έτος και ισούται συνήθως με 705.5

E_{cycle} είναι η μέση παραχθείσα ενέργεια από κάθε παλιρροϊκό κύκλο και η οποία ορίζεται ως εξής:

(Jacob, 2006)

$$E_{\text{cycle}} = \frac{E_s + E_n}{2} = \frac{4 \cdot \left[\int_{T_1}^{T_2} P \cdot dt + P_{\text{AVG}} \cdot (T_3 - T_2) \right] + 4 \cdot \left[\int_{T_1}^{T_3} P \cdot dt \right]}{2} \quad (\text{σε μονάδες Joule})$$

όπου E_s : η παραχθείσα ενέργεια κατά το σχηματισμό πλημμυρίδας,

E_n : η παραχθείσα ενέργεια κατά το σχηματισμό άμπωτης,

T_1 : η χρονική στιγμή όπου ο ρότορας το παλιρροϊκό ρεύμα φτάνει και ξεπερνά το κάτω όριο λειτουργίας $V_{\text{CUT-IN}}$,

T_2 : η χρονική στιγμή όπου ο ρότορας το παλιρροϊκό ρεύμα φτάνει και ξεπερνά τη μέση ταχύτητα V_{AVG}

T_3 : ισούται με το ένα τέταρτο της περιόδου, δηλαδή με $T/4$.

Έστω λοιπόν, ότι για την κατασκευή μίας παλιρροϊκής εγκατάστασης, λαμβάνεται ένα δάνειο προκειμένου να καλυφθούν το σύνολο του οικονομικού της κόστους C . Αυτό σημαίνει ότι για τα επόμενα χρόνια, η αρμόδια εταιρία κατασκευής του στροβίλου θα οφείλει να καταβάλλει ετησίως τη δόση αποπληρωμής AR για την εξόφληση της δανειακής της υποχρέωσης.

Η πλήρης αποπληρωμή του δανείου θα τελεσθεί σε N χρόνια με τόκο αποπληρωμής i . Επομένως, η ετήσια αποπληρωμή ορίζεται ως:

$$AR = \frac{C \cdot (1 + N)^i}{(1 + N)^i - 1}$$

Σε αυτό το κόστος έρχεται να προστεθεί το ετήσιο κόστος συντήρησης CM που υπολογίζεται περί το 3% του κόστους κατασκευής. Συνεπώς, το ετήσιο κόστος AC της παλιρροϊκής τουρμπίνας είναι $AC=AR+CM$.

Βάσει αυτού, ορίζεται το κόστος της παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας CP ως

$$CP = \frac{AC}{E_{cycle}} \text{ (€/KWh)} \quad \text{(Jacob, 2006)}$$

Σε αυτό το κόστος, έρχεται να προστεθεί το ετήσιο κόστος συντήρησης του ηλεκτρικού δικτύου καθώς και το κέρδος της εταιρίας παροχής ηλεκτρισμού που διαμορφώνουν την τελική τιμή της KWh για τον καταναλωτή.

4.4. Σπηλαίωση

Μία παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός παλιρροϊκού στροβίλου είναι η ανάπτυξη σπηλαίωσης. Σπηλαίωση είναι η τοπική ανάπτυξη υποπίεσης κατά τόπους στο ρευστό που διαρρέει την τουρμπίνα που προκύπτει από τοπικά μεγάλες διαφορές πιέσεων. Ως αποτέλεσμα έχει τη δημιουργία φυσαλίδων επί του δρομέα της τουρμπίνας κάτι που με τη σειρά του μπορεί να δημιουργήσει ένα διαβρωτικό περιβάλλον για τη λειτουργία του στροβίλου. Ο συντελεστής σπηλαίωσης για μία στροβιλομηχανή ορίζεται ως: **(Turnock & Wood, 2009)**

$$\sigma = \frac{p_{atm} + \rho gh - p_v}{0.5 \rho V^2} \text{ όπου}$$

$p_{atm}=101.3 \text{ Kpa}$ (ατμοσφαιρική πίεση), $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$ (πυκνότητα του νερού),

$p_v=2000 \text{ Pa}$ (η τάση ατμών), h : βαθυμετρικό ύψος της γεννήτριας (m),

$g=10 \text{ m/s}^2$ (επιτάχυνση της βαρύτητας)



Εικόνα 4.14: Εκτεταμένη διάβρωση στα πτερύγια στροβιλομηχανής, η οποία προκλήθηκε από το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Πηγή: <http://www.steelfuture.com/de/images/lofthumbs/702x300/images/stories/generatori-di-potenza/turbina-francis.jpg>

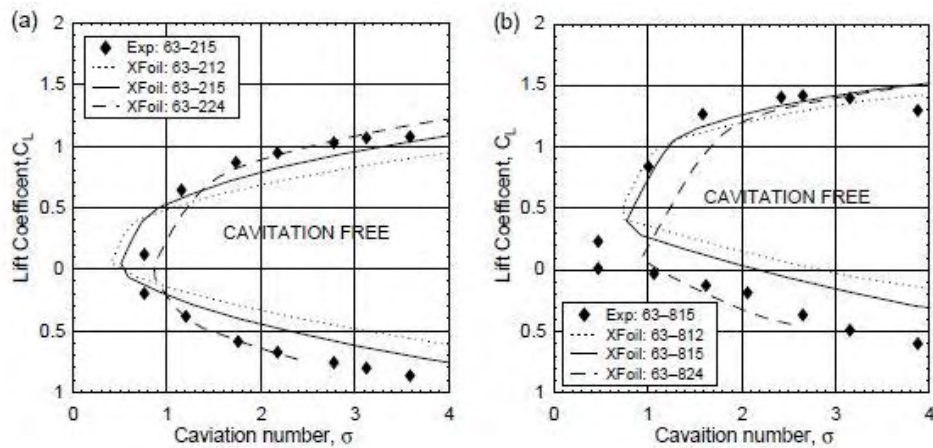
Ο συντελεστής πίεσης στο στρόβιλο είναι: $C_{pressure} = \frac{P_L - P_0}{0.5\rho V^2}$

όπου p_0 : η πίεση του θαλάσσιου ρεύματος

και p_L : η τοπική πίεση του θνερού γύρω από το πτερύγιο.

Ο σχηματισμός σπηλαιώσης αρχίζει να είναι πλέον εμφανής όταν $p_L = p_v$, ή όταν η αρνητική τιμή του συντελεστή πίεσης αποκτά τιμή ίση με αυτή του συντελεστή σπηλαιώσης ($-C_{pressure} = \sigma$). (Batten & Molland, 2006)

Δεδομένου ότι ο συντελεστής άνωσης C_L εκφράζει την κατανομή των διαφορών πιέσεων, μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 4.15, την περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (όπου δε σχηματίζεται σπηλαιώση) μίας παλιρροϊκής τουρμπίνας σε ένα διάγραμμα του συντελεστή σπηλαιώσης ως συνάρτηση του συντελεστή άνωσης. Για αυτήν την περιοχή ενδείκνυται να γίνεται ο σχεδιασμός ενός τέτοιου στρόβιλου, προκειμένου να μην υπάρξει κάποιο πρόβλημα τέτοιας διάβρωσης μελλοντικά.



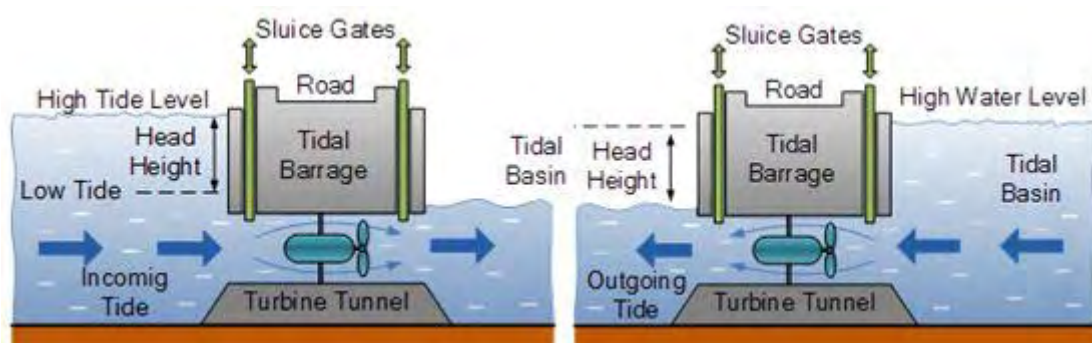
Εικόνα 4.15: Διαγράμματα της μεταβολής της σπηλαίωσης ως συνάρτηση της άνωσης για δύο διαφορετικούς τύπους πτερυγίων. Είναι εμφανής η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας στα δύο διαγράμματα. (Batten & Molland, 2006)

4.5. Παλιρροϊκά φράγματα

Μία ακόμη ιδέα παλιρροϊκής εκμετάλλευσης, πάνω στην οποία βασίστηκε ο σχεδιασμός παλιρροϊκών λιμνών, είναι αυτή των παλιρροϊκών φραγμάτων. Σε αντίθεση με πολλούς φράχτες, το παλιρροϊκό φράγμα επιτέπει τη ροή του νερού κατά την πλημμυρίδα ενώ με την ανύψωση θυρών στέλνει το νερό πίσω κατά την άμπωτη, όπως φαίνεται στην εικόνα που παρατείνεται παρακάτω. Κάτω από το παλιρροϊκό φράγμα βρίσκεται τοποθετημένη μία παλιρροϊκή τουρμπίνα η οποία τίθεται σε λειτουργία με τη ροή του εργαζόμενου μέσου (δηλαδή του νερού). (Roberts & Khan, 2016) Η παραχθείσα ισχύς προσδιορίζεται ως:

$$P = \frac{A_b \rho g H^2}{2t} \varepsilon$$

όπου A_b : η επιφάνεια απορροής σε m^2 , t : το χρονικό διάστημα λειτουργίας σε sec,
 H : το μέγιστο υδραυλικό ύψος σε m, ε : ο συντελεστής απόδοσης της στροβιλομηχανής.



Εικόνα 4.16: Απεικόνιση της λειτουργίας ενός παλιρροϊκού φράγματος κατά την πλημμυρίδα (αριστερά) και την άμπωτη (δεξιά). Πηγή: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/tidal-energy/tidal-barrage.html>

Παρά το ότι τα παλιρροϊκά φράγματα έχουν πολύ καλή ενεργειακή απόδοση και αναπτύσσουν ιδιαίτερα αξιόπιστη λειτουργία, παρουσιάζουν περιβαλλοντικά προβλήματα ενώ η κατασκευή τους κρίνεται αρκετά δαπανηρή. Αυτός είναι και ο λόγος που αυτή τη στιγμή λειτουργούν μόλις πέντε μεγάλες εγκαταστάσεις παγκοσμίως. (Charlier, 2007) Οι πιο χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις παλιρροϊκών φραγμάτων είναι οι παρακάτω:

- Στον ποταμό Ρανς στη Βρετάνη (για την οποία έγινε αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο).
- Ο παλιρροϊκός ηλεκτρικός σταθμός στην περιοχή της Gislaya Guba στη Ρωσία, ισχύος 1.7 MW, θεωρείται ο παλαιότερος του είδους.
- Ο παλιρροϊκός ηλεκτρικός σταθμός της λίμνης Sihwa στη Νότια Κορέα, ισχύος 254 MW, είναι ο σταθμός με τη μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος ανάμεσα σε αυτούς του ίδιου είδους. (Blanden & Bahaj, 2006)



Εικόνα 4.17: Ο παλιρροϊκός υδροηλεκτρικός σταθμός στην περιοχή της Gislaya Guba στη Ρωσία. Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Kislaya_Guba_Tidal_Power_Station#/media/File:Kislaya_Guba_tidal_power_station.JPG

Κεφάλαιο 5. Αρχές και σύγχρονες μέθοδοι υπολογιστικού σχεδιασμού

Μία από τις πρώτες παραμέτρους αναφορικά με το σχεδιασμό μίας παλιρροϊκής τουρμπίνας είναι η μέθοδος εγκατάστασης που θα χρησιμοποιηθεί. Κατόπιν υπολογισμών έχει αποδειχτεί ότι η αξονική δύναμη και η ροπή που ασκούνται στο δρομέα μίας παλιρροϊκής τουρμπίνας ορίζονται αντίστοιχα ως:

$$F = \frac{1}{2} C_F \rho U_\infty^2 S \text{ (N)} \quad \text{και} \quad T = \frac{1}{2} \rho C_T S R U_\infty^2 \text{ (Nm)}$$

όπου με C_F, C_T ορίζονται αντίστοιχα οι αδιάστατοι συντελεστές αξονικής δύναμης και ροπής και οι οποίοι προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα (Σταπουντζής, 2013). Δεδομένης της μέγιστης ταχύτητας ρεύματος, εξάγονται ποσοτικά η μέγιστη δυνατή αξονική δύναμη και μέγιστη δυνατή ροπή. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα δύο πρώτα μεγέθη βάσει των οποίων γίνεται σε πρώτη φάση μία στατική μελέτη αντοχής και έπειτα μελέτη πολυκυκλικής κόπωσης στην εγκατάσταση της τουρμπίνας, διακρίνοντας έτσι τις αντοχές που παρουσιάζει το σύνολο της δομής. Για τη συγκεκριμένη μελέτη υπολογίζονται τα μέγιστα και ελάχιστα τασικά φορτία που επικρατούν ενώ λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιηθέντων υλικών προκειμένου να γίνει εφαρμογή κανόνων όπως αυτών των Miner, Goodman και Basquin ώστε να εξαχθεί συμπερασματικά πόσο καλά ανταποκρίνεται η κατασκευή της τουρμπίνας στα εφαρμοζόμενα τασικά φορτία ή αν τυχόν πρέπει να λάβουν χώρα κάποιες βελτιώσεις σχεδιασμού.

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_{ισοδ}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{us}} = 1 \text{ Κανόνας Goodman}$$

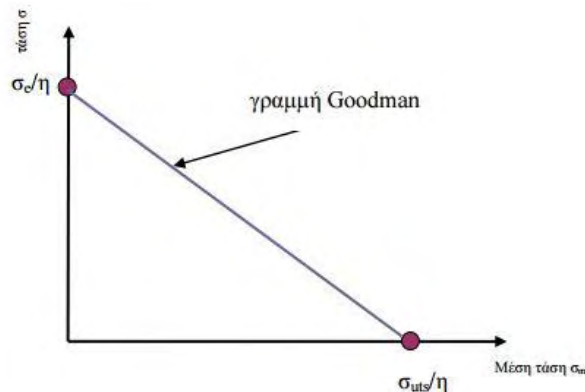
σ_A : η ημιδιαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη εφαρμοζόμενη τάση.

$\sigma_{ισοδ}$: η ημιδιαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη εφαρμοζόμενη τάση στην περίπτωση όπου η μέση εφαρμοζόμενη τάση είναι μηδενική.

σ_m : η μέση εφαρμοζόμενη τάση

σ_{uts} : το όριο αντοχής ενός υλικού.

Μέσω του κανόνα αυτού, καθορίζονται οι επιτρεπόμενες τάσεις σχεδιασμού σε συνθήκες κόπωσης, για δεδομένο συντελεστή ασφάλειας η όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου το τρίγωνο που εσωκλείεται από του δύο κάθετους άξονες και την καμπύλη Goodman είναι ασφαλής περιοχή εφαρμογής φορτίων.



Εικόνα 5.1: Σχεδιάγραμμα της καμπύλης Goodman.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 \text{ Κανόνας Miner}$$

Ο κανόνας του Miner ενδείκνυται σε περιπτώσεις με πολλαπλά τμήματα φόρτισης και αναπαριστά τη συσσώρευση κόπωσης που οδηγεί σε αστοχία. Με n_i συμβολίζεται ο αριθμός κύκλων φόρτισης σε κάθε τμήμα ενώ με N_{fi} ο αριθμός κύκλων φόρτισης για αστοχία στο κάθε τμήμα.

$$\sigma_A = \sigma_f' (2N_f)^b \text{ Κανόνας Basquin}$$

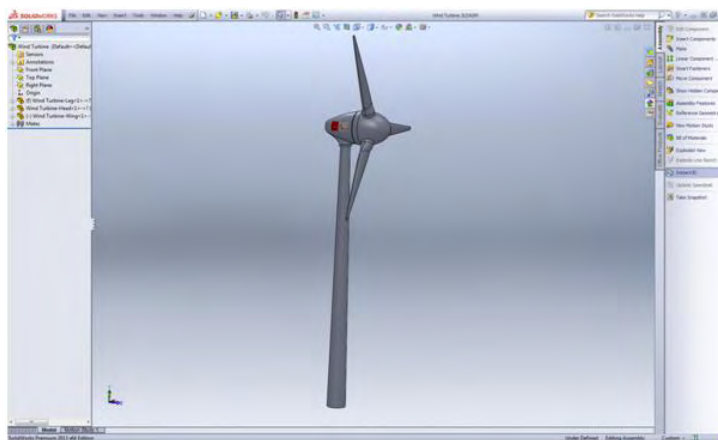
Οι σ_f' και b αποτελούν δύο πειραματικές σταθερές ανάλογες του υλικού και N_f είναι ο αριθμός των κύκλων ζωής που εκτελεί η κατασκευή προτού το υλικό της φτάσει σε αστοχία και αυτό θέλει ένας σχεδιαστής να μεγιστοποιήσει.

Μία αναλυτική μελέτη με τέτοιου τύπου κανόνες και υπολογισμούς μπορεί να αποτελέσει πολύ μεγάλο υπολογιστικό φορτίο για τη δομή μίας εγκατάστασης με πληθώρα διαφορετικών υλικών και εξαρτημάτων.

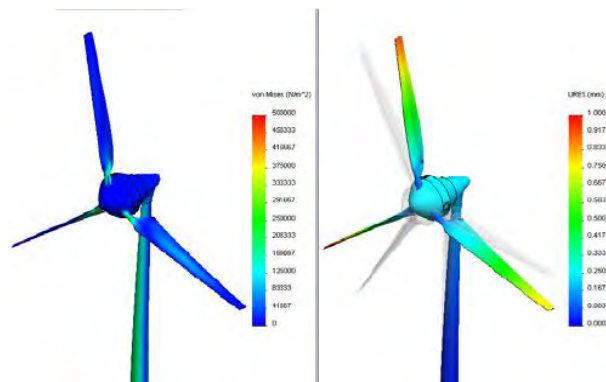
Πλέον, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των υπολογιστών καθιστά το σχεδιασμό και τη μελέτη τέτοιων κατασκευών πολύ ευκολότερη υπόθεση συγκριτικά με το παρελθόν. Έτσι, ο χρόνος και το απαιτούμενο υπολογιστικό φορτίο ελαχιστοποιούνται με πολύ

μεγάλη ακρίβεια. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πολλά προγράμματα σχεδιασμού σε υπολογιστές τα οποία πέρα από το ότι διευκολύνουν τη σχεδίαση τέτοιων δομών, δίνουν στο χρήστη το περιθώριο μελέτης αναλύσεων θερμοκρασιών, αντοχής υλικών, κόπωσης, ρευστομηχανικής κ.ά.

Ίσως το πιο διαδεδομένο πρόγραμμα μηχανολογικής σχεδίασης με τέτοιες εφαρμογές τα τελευταία χρόνια είναι το Solidworks της γαλλικής πολυεθνικής εταιρίας λογισμικού Dassault Systems. Στο υπολογιστικό του περιβάλλον, ο χρήστης έχει τις επιλογές σχεδιασμού και αναλύσεων όπως αυτών που αναφέρθηκαν πρωτύτερα παίρνοντας αποτελέσματα με πολύ καλή ακρίβεια και με μικρό περιθώριο σφάλματος.



Εικόνα 5.2: Μοντέλο παλιρροϊκού υδροστροβίλου σχεδιασμένο στο πρόγραμμα Solidworks. Πηγή: <https://www.matrixsl.com/blog/flowcode-6-compatibility-with-solidworks/>



Εικόνα 5.3: Στατική μελέτη τασικών φορτίων και μελέτη κόπωσης υδρογεννήτριας στο Solidworks.

Πηγή: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRIxegtk3c8xlii_DAahzofKKrV4jNeSDHBWmtN5oW_z33J0p

Oa

Έχοντας ήδη κάνει σχεδίαση μίας τέτοιας τουρμπίνας στο Solidworks, ο μηχανικός έπειτα κάνει μία στατική μελέτη εισάγοντας ως δεδομένα τα τασικά φορτία που επικρατούν στα διάφορα σημεία της κατασκευής. Ακολούθως, θα διαπιστώσει εάν ο συντελεστής ασφάλειας είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εξασφαλίζεται η απουσία αστοχίας υλικού στη δομή του υδροστροβίλου. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως:

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma}$$

όπου σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού και σ η εφαρμοζόμενη τάση σε αυτό.

(Αν ο συντελεστής είναι μικρότερος της μονάδας, έχουμε αστοχία.)

Επίσης, μία πολύ απλή μέθοδος ελέγχου της αντοχής σε στατικά φορτία μίας τέτοιας κατασκευής είναι αυτή της διαστασιολόγησης ατράκτου που αναφέρεται σε βιβλία μηχανικής των υλικών. Σύμφωνα με αυτήν το κριτήριο σχεδιασμού είναι: $\sigma_e|_{\max} \leq \sigma_0$

$$\text{όπου } \sigma_e|_{\max} = \frac{M_e}{I} R = \frac{\sqrt{M^2 + 0.75T^2}}{\pi R^4} R = \frac{\sqrt{M^2 + 0.75T^2}}{\pi R^3} \quad (\text{Αράβας, 2005})$$

M_e : «ισοδύναμη ροπή» απορρέουσα από τη ροπή κάμψης M και τη ροπή στρέψης T .
 I : ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής ατράκτου όπου ισούται με πR^4 όπου R είναι η ακτίνα της ατράκτου.

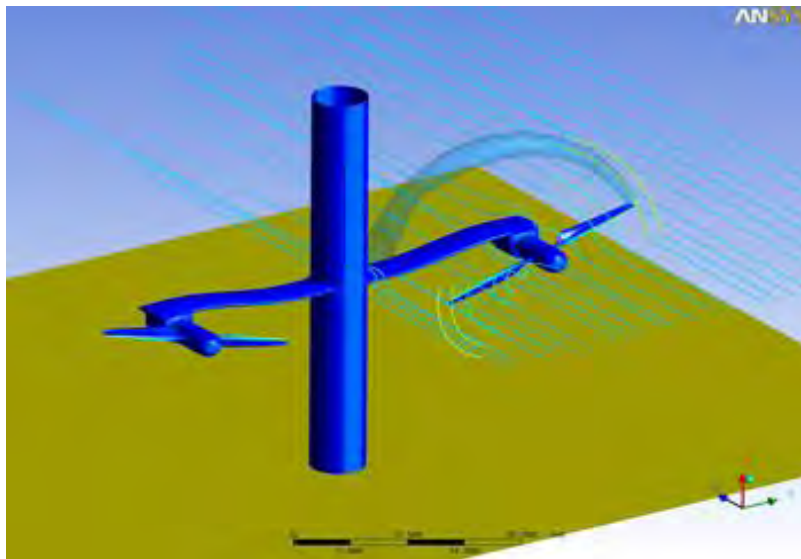
$\sigma_e|_{\max}$: το μέγιστο εφαρμοζόμενο τασικό φορτίο το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο με το επιτρεπόμενο όριο σ_0 που έχει ορίσει ο σχεδιαστής μηχανικός.

Πάνω στα δεδομένα αυτής της ανάλυσης, γίνεται η ανάλυση κόπωσης όπου για πολυκυκλική κόπωση αντιστοιχεί σε 10^7 κύκλους. Το αποτέλεσμα που θα εξαχθεί είναι ο αριθμός κύκλων που θα υποστεί η τουρμπίνα προτού φτάσει σε πιθανή αστοχία.

Ένα πολύ σημαντικό στάδιο μελέτης μίας τέτοιας δομής είναι αυτό της ρευστομηχανικής ανάλυσης. Σε αναλυτικό επίπεδο, μία τέτοια μελέτη θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρος αφού το πλήθος του υπολογιστικού της φορτίου θα ήταν πολύ μεγάλο. Επίσης, σε μία τέτοια μελέτη έρχεται να προστεθεί η παρουσία τύρβης για την οποία σε πολλές περιπτώσεις ενδέχεται να μην είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων. Η πειραματική μελέτη σε μοντέλα μικρότερης ή και ίδιας κλίμακας συνήθως δίνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, όμως κάτι τέτοιο –κατά κύριο λόγο- απαιτεί υψηλό χρηματικό κόστος και η πραγμάτωσή

του να καθίσταται δύσκολη. Συνεπώς, η υπολογιστική μελέτη της τουρμπίνας γίνεται πλέον η πιο εφικτή λύση για λόγους που έχουν ήδη διατυπωθεί. Ένα πολύ διαδεδομένο πρόγραμμα τέτοιων εφαρμογών είναι το ANSYS FLUENT της ομώνυμης αμερικανικής εταιρίας Ansys Inc. Στο πρόγραμμα αυτό υπάρχει η επιλογή εισαγωγής ενός ήδη υπάρχοντος μοντέλου όπως ενός μοντέλου σχεδιασμένου στο Solidworks ή η σχεδίαση ενός νέου εντός του ANSYS FLUENT.

Στη συνέχεια, το μοντέλο εισάγεται σε έναν κατάλληλο όγκο ελέγχου δια μέσω του οποίου προσομοιώνεται η ροή του ρευστού (στην συγκεκριμένη περίπτωση, νερού). Σε αυτό το σημείο, υπάρχει η επιλογή μίας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αναφορικά με την αντοχή υλικού της δομής ή μίας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μελέτης. Στη δεύτερη περίπτωση, είναι πλέον εμφανή όλα τα ροϊκά χαρακτηριστικά του νερού που διαπερνά την τουρμπίνα, ενώ το κύριο κομμάτι ενδιαφέροντος είναι οι πιέσεις και ταχύτητες που επικρατούν στο ρευστό κατά την είσοδο και έξοδό του από το δρομέα όπως και πάνω σε αυτόν. Αυτό συμβαίνει διότι η αποδιδόμενη ισχύς του στροβίλου είναι ανάλογη της πτώσης πίεσης του ρευστού και των επιμέρους ταχυτήτων όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο αναφορικά με τη λειτουργία των παλιρροϊκών τουρμπινών.



Εικόνα 5.4: Αναπαράσταση ροϊκών γραμμών παλιρροϊκής τουρμπίνας σε περιβάλλον προσομοίωσης στο πρόγραμμα ANSYS FLUENT.

Πηγή: <http://www.ansys-blog.com/fh-tidal-power-and-turbine-design/>

Σε αυτό το σημείο έρχεται η επιλογή της βάσης στήριξης που θα χρησιμοποιηθεί. Η επιλογή αυτή πρέπει να γίνει με προσοχή και ενδελεχή μελέτη καθώς πέρα από την αντοχή που πρέπει να διαθέτει, πρέπει να μην προκαλεί περιβαλλοντικές διαταραχές στο βυθό και τις υδάτινες μάζες της περιοχής στην οποία τοποθετείται. Επίσης, εν προκειμένω μία οικονομική ανάλυση αναδεικνύεται πολύ σημαντική καθώς εξ αυτής κρίνεται

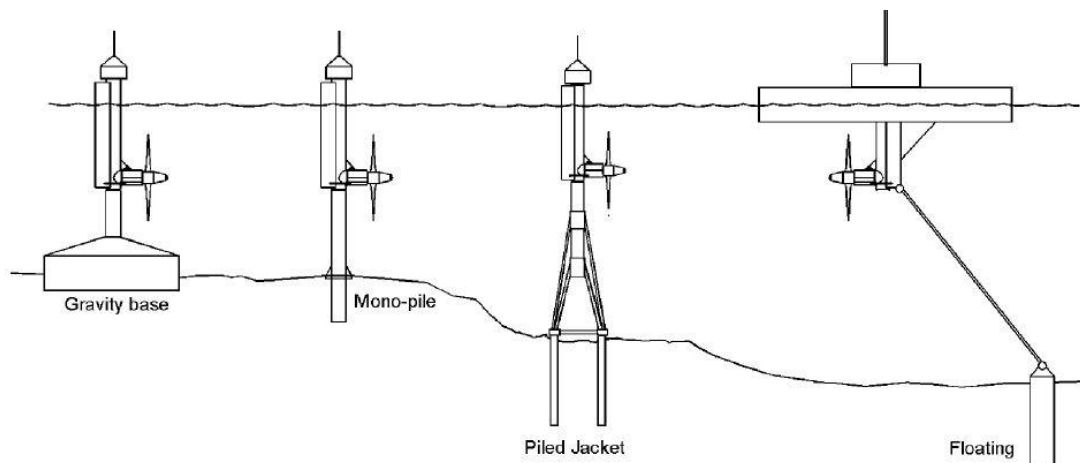
Οι μέθοδοι στήριξης είναι οι εξής:

Βάση βαρύτητας

Βάση μονής στήλης

Βάση πολλαπλών στηλών

Επιπέδουσα βάση



Εικόνα 5.5: Εικόνα στην οποία παρουσιάζεται η δομή των τεσσάρων διαφορετικών μεθόδων στήριξης ενός παλιρροϊκού υδροστροβίλου. (Fraenkel, 1998)

Η πρώτη επιλογή καθίσταται η πιο ανθεκτική σε μεγάλα τασικά φορτία καθώς η πάκτωση της τουρμπίνας σε μία βάση σκυροδέματος ή χάλυβα έχει αποδειχθεί μία πολύ καλή λύση. Ωστόσο, μία τέτοια επιλογή ενδέχεται να έχει σχετικά υψηλό κόστος ενώ μπορεί να δημιουργήσει επιπλοκές στο υδάτινο οικοσύστημα της περιοχής. Από την άλλη, μία επιλογή με αρκετά χαμηλό κόστος είναι αυτή της επιπέδουσας βάσης, η οποία λειτουργεί σε χαμηλό βάθος από την επιφάνεια ενώ η στήριξή της επιτελείται από αλυσίδες δεμένες σε μεταλλικά βάρη αγκιστρωμένα στον πυθμένα. Επίσης, το συγκεκριμένο σύστημα έχει το θετικό χαρακτηριστικό ότι η κατεύθυνσή του μπορεί να είναι εναλλασσόμενη ανάλογα την κατεύθυνση των παλιρροϊκών ρευμάτων. Παρά ταύτα, μία τέτοια κατασκευή είναι ευπαθής σε ρεύματα υψηλής ταχύτητας και μεγάλα τασικά

φορτία. Για αυτόν το λόγο και η εφαρμογή μίας τέτοιας βάσης στήριξης έχει μικρό εύρος. Συμπερασματικά, οι επιλογές με το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών στις παλιρροϊκές γεννήτριες είναι αυτές της μονής ή πολλαπλών στηλών χάλυβα καθώς το κόστος, οι εργασίες εγκατάστασης και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ελαχιστοποιούνται. Επιπλέον, παρουσιάζεται το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολη η ανύψωση και υποστολή της γεννήτριας για τεχνικούς λόγους (Fraenkel, 1998).

Η αρχική ιδέα ως προς την εκμετάλλευση παλιρροϊκών ρευμάτων ήταν όμοια με αυτή των ανεμογεννητριών. Έτσι, σε μεγάλο αριθμό τέτοιων εφαρμογών η τουρμπίνα είναι στα πρότυπα ανεμογεννήτριας με δύο ή τρία πτερύγια και με τις ίδιες αρχές σχεδιασμού.

Αναφορικά με το σχεδιασμό μίας τέτοιας γεννήτριας, πρέπει σε πρώτη φάση να ορισθούν η ταχύτητα του ρεύματος U (m/s), η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω (rad/s) και (το κυριότερο) η παραχθείσα ισχύς P (Watt) που επιθυμείται. Κάνοντας υποθέσεις ή γνωρίζοντας τις όποιες μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες, ο σχεδιαστής μηχανικός καταλήγει στο ποια θα είναι η πραγματική ποσότητα μηχανικής ισχύος και συνεπώς πως θα διαστασιολογηθεί ο δρομέας του στροβίλου (διάμετρος δρομέα D). Σύμφωνα με τις περισσότερες μελέτες που έχουν δημοσιευθεί ο καταλληλότερος τύπος πτερυγίου για εφαρμογές εκμετάλλευσης της παλίρροιας είναι ένας εκ της σειράς NACA 63xxx καθώς έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε τασικά φορτία από ότι πτερύγια της σειράς NACA με διαφορετική τυποποίηση. (Bir, Lawson, & Li, 2011)

Ο μηχανικός που θα σχεδιάσει κατάλληλα μία τέτοια γεννήτρια, θα κληθεί να κάνει πλήθος επιμέρους υπολογισμών σχετικά με τους διάφορους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας δύναμης C_L και C_D , των γωνιών προσβολής α και πρόσπτωσης φ όπως και του τοπικού πλάτους των πτερυγίων καθώς αυτά έχουν συστροφή ανάλογη των φορτίων που πρέπει να δεχτούν και της μηχανικής των υλικών τους. Μία πολύ καλή φιλοσοφία σχεδίασης προτάθηκε από το D. LeGourieres το 1982 στο βιβλίο του WindPowerPlants: Theory&Design, σύμφωνα με τον οποίο, προτείνεται μία απλούστευση των υπολογισμών για το σχεδιασμό των πτερυγίων. Αυτή η απλούστευση ανταποκρίνεται σε μειωμένη απαίτηση ακρίβειας και βασίζεται στην υπόθεση των τριών εξής παραδοχών:

$$C_D = 0 \quad \varepsilon = \tan^{-1} \frac{C_D}{C_L} = 0 \quad C_D/C_L = 0$$

Έτσι προκύπτουν οι εξής πράξεις για τον υπολογισμό του πλάτους και της γωνίας πρόσπτωσης σε κάθε σημείο της πτέρυγας (LeGourieres, 1982)

Συντελεστές Glauert

$$k = \left(\sqrt{\lambda^2 + 1} \right) \cos \left[60^\circ + \frac{1}{3} \tan^{-1} \lambda \right]$$

$$h = \sqrt{1 + \frac{1 - k^2}{\lambda^2}}$$

Βέλτιστος τοπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου

$$C_{p_{opt}} = \lambda^2 (1 + k)(h - 1)$$

Γωνία θ

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1 + k}{\lambda(1 + h)} \right)$$

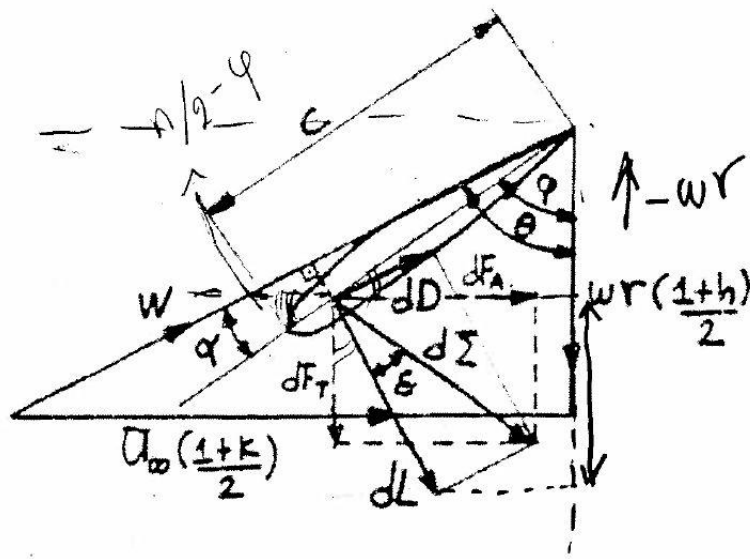
Πλάτος c , γωνία προσβολής α και γωνία πρόσπτωσης ϕ

$$c = \left(\frac{1 - k}{1 + k} \right) \frac{8\pi r \sin^2 \theta}{C_L B \cos \theta}$$

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \frac{r}{R}$$

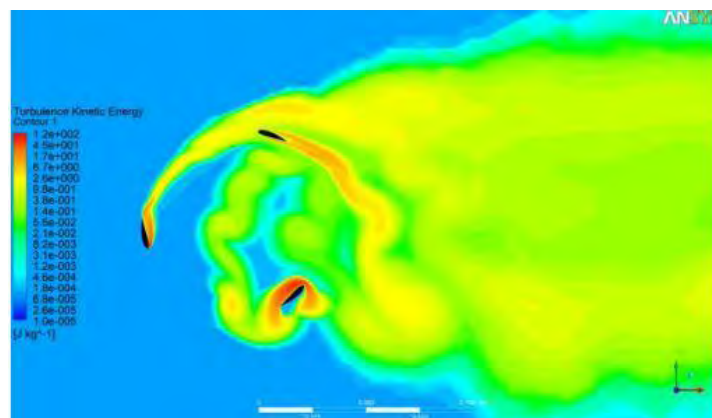
$$\phi = \theta - \alpha$$

όπου με B συμβολίζεται ο αριθμός πτερυγίων του δρομέα, ενώ α_1 και α_2 είναι σταθερές βάσει των οποίων καθορίζεται η γραμμική μεταβολή της γωνίας προσβολής από την αρχή της πτέρυγας (που συνήθως είναι σε απόσταση $r/R=0.1$) ως το τέλος της ($r/R=1$).



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα στο οποίο αναπαρίστανται πλήρως τα τρίγωνα ταχυτήτων και οι γωνίες που αναπτύσσονται στην πτέρυγα ενός δρομέα. (Σταπουντζής, 2013)

Για μία γεννήτρια που βασίζεται στον τύπο Darrieus, ο οποίος είναι ο κύριος τύπος των υδροστροβίλων εγκάρσιου άξονα, ο σχεδιασμός φαινομενικά μπορεί να είναι πολύ απλούστερος όπως αυτός παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, απαιτείται μεγάλη αναλυτική, υπολογιστική και πειραματική μελέτη αυτών των στροβίλων καθώς η τύρβη που αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία τους, παρουσιάζει έντονη διαχυτικότητα και ενδεχομένως μεγάλες μηχανικές απώλειες στη δομή.



Εικόνα 5.7: Διδιάστατη ρευστομηχανική ανάλυση τουρμπίνας τύπου H-Darrieus στο υπολογιστικό πρόγραμμα AnsysFluent. Είναι εμφανής η έντονη παρουσία τύρβης κατά την περιστροφή του ρότορα. (Lanzafame, Mauro, & Messina, 2013)

Κεφάλαιο 6.

Σύγχρονοι παλιρροϊκοί υδατοστροβίλοι

Τα τελευταία χρόνια δεν είναι λίγες οι εταιρίες όπου έχουν αναπτύξει δικές τους ευρεσιτεχνίες αναφορικά με την εκμετάλλευση των παλιρροϊκών ρευμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η άποψη που επικράτησε ήταν η δημιουργία υδατοστροβίλων κατά τα πρότυπα των ανεμογεννητριών. Για αυτόν το λόγο τα περισσότερα είδη των υδατοστροβίλων όπου έχουν κατασκευασθεί είναι αξονικής ροής. Αυτό συμβαίνει διότι έτσι είναι πολύ πιο άμεση η μετατροπή της θαλάσσιας κίνησης σε κινούσα περιστροφική δύναμη στις γεννήτριες. Επίσης, τέτοιες δομές παρουσιάζουν πολύ καλές προοπτικές λόγω του χαμηλού κόστους και του χαμηλού βάρους κατασκευής, ενώ ενδείκνυνται καλύτερα στην πλειοψηφία των γεωγραφικών σημείων που χρίζουν τέτοιας εκμετάλλευσης.

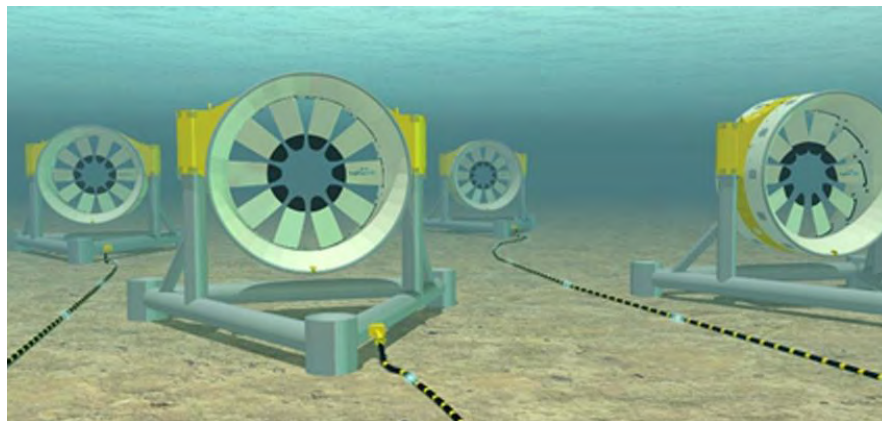
Από την άλλη, υπάρχουν και δομές παλιρροϊκών υδατοστροβίλων ακτινικής ροής. Λόγω, όμως, του ότι τα παλιρροϊκά ρεύματα παρουσιάζουν συνήθως ένα μεγάλο επιφανειακό εύρος ροής, ο σχεδιασμός στροβίλων ακτινικής ροής αποκτά δυσκολίες. Για αυτόν το λόγο, οι στροβίλοι ακτινικής ροής απαιτούν ιδιαίτερες σχεδιαστικές λεπτομέρειες όπως κατάλληλο προσανατολισμό και εύρος της ροής (που επιτυγχάνεται συχνά με τεχνητές δομές), καταλληλότητα του γεωγραφικού σημείου, αλλά και πολλές φορές βαριές δομικές εγκαταστάσεις που αυξάνουν αισθητά το κόστος, ενώ ενδέχεται να δημιουργούν αυξημένες περιβαλλοντικές ανησυχίες.

OpenCenterTurbine

Ο συγκεκριμένος υδατοστροβίλος αναπτύχθηκε από την ιρλανδική εταιρία OpenHydro. Είναι αξονικής ροής και η ονομασία του παραπέμπει στο άνοιγμα που έχει το κέντρο του, δηλαδή στον άξονα συμμετρίας της περιστροφικής κίνησης. Ο δρομέας βρίσκεται μέσα σε αγωγό, ο οποίος κατευθύνει προς αυτόν την κίνηση του ρεύματος. Τα στηλώματα της τουρμπίνας είναι εγκατεστημένα στο βυθό όπου και σχηματίζουν μία βάση στήριξης, σχεδιασμένη να αντέχει μεγάλα δυναμικά φορτία. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης κατασκευής έγκειται στην ύπαρξη μαγνητικού στάτορα στην περιφέρεια της περωτής (παρόμοια λειτουργία με αυτή του δυναμό) που παράγει ηλεκτρικό **ρεύμα** συνεχούς **τάσεως**, μέσω της **ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής**. Αυτό, αυτομάτως, σημαίνει ανυπαρξία κιβωτίου μετάδοσης της κίνησης άρα και μείωση των λιπαντικών ουσιών.

Συνεπώς, έχουμε μειωμένα έξοδα συντήρησης και κατασκευής της μονάδας, συγκριτικά με άλλες τέτοιες εγκαταστάσεις. Η μάζα της τουρμπίνας ανέρχεται γύρω στους 300 tn, της βάσης περί τους 700, ενώ τα υλικά που χρησιμοποιούνται, στο μεγαλύτερό της μέρος, είναι διαφόρων ειδών χάλυβες. Σύμφωνα με την εταιρία, η διάμετρος του δρομέα είναι 16 m, ο άξονας περιστροφής απέχει από το βυθό 12-17 m και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο στρόβιλος είναι περίπου 2 MW. Το εύρος ταχυτήτων του θαλάσσιου ρεύματος για τις οποίες ενδείκνυται η λειτουργία του είναι μεταξύ 0.7 και 2.57 m/s. Σε ταχύτητες κάτω των 0.7 m/s η λειτουργία καθίσταται αντιοικονομική, ενώ σε ταχύτητες άνω των 2.57 m/s, τα τασικά φορτία που αναπτύσσονται είναι μεγάλα και εγκυμονούν κινδύνους πιθανής αστοχίας υλικού.

Επιπλέον, το υψηλότερο σημείο της κατασκευής βρίσκεται πάντοτε τουλάχιστον 15 m κάτω από τη θαλάσσια επιφάνεια, κάτι που δε δημιουργεί προβλήματα στη ναυτιλία. Η συγκεκριμένη δομή έχει βρει πληθώρα εφαρμογών, τα τελευταία χρόνια, σε θαλάσσιες περιοχές του Καναδά.



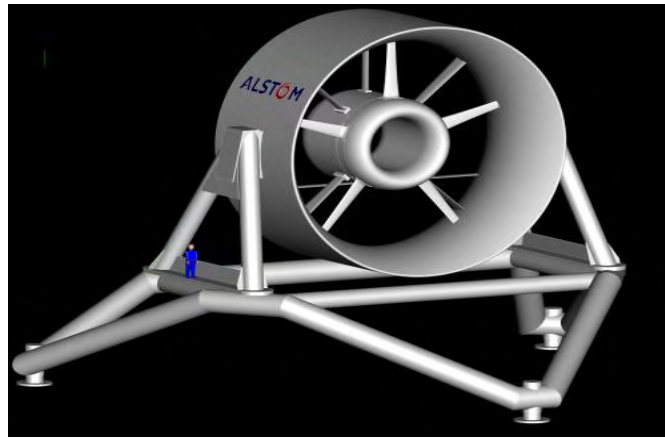
Εικόνα 6.1: Εικονική αναπαράσταση παλιρροϊκής «φάρμας» με στρόβιλους τύπου Open Center.

Πηγή: <http://www.openhydro.com/Environment/Overview>

BELUGA 9

Ο υδατοστρόβιλος έχει αναπτυχθεί, από τη γαλλική πολυεθνική εταιρία Alstom, ήδη από το 2009 και το 2012 έγιναν οι πρώτες πειραματικές εγκαταστάσεις του στον κόλπο Fundy του Καναδά. Είναι αξονικής ροής και, όπως ο OpenCenter που αναφέραμε πρωτίτερα, ο δρομέας βρίσκεται μέσα σε αγωγό, ο οποίος κατευθύνει προς αυτόν την κίνηση του ρεύματος. Η εγκατάστασή του γίνεται πάνω σε μεταλλική βάση στήριξης που βρίσκεται στον πυθμένα και σχηματίζει τρίποδο. Η Beluga 9 είναι σχεδιασμένη για αρκετά

δυνατά ρεύματα (άνω των 4.5 m/s) και μέγιστη ισχύ 1 MW. Η διάμετρος του αγωγού είναι 20 m, του δρομέα 13 m και η εγκατάστασή του γίνεται σε βάθος μεγαλύτερο των 30 m.



Εικόνα 6.2: Μοντέλο της BELUGA 9, όπως αυτό απεικονίζεται σε υπολογιστή.
Πηγή: <http://csmres.co.uk/cs.public.upd/article-images/Beluga.jpg>

Tidel

Η εταιρία SMDHydrovision ανέπτυξε ένα μοντέλο υδατοστρόβιλου παρόμοιο με αυτό των ανεμογεννητριών. Αποτελείται από 2 τουρμπίνες, με 2 πτερωτές η καθεμία, οι οποίες έχουν διάμετρο δρομέα 15 m και είναι ενωμένες μεταξύ τους με μία δοκό ανάμεσα στα κιβώτια μετάδοσης της κίνησης τους. Από κοινού έχουν μέγιστη ισχύ 1 MW σε ταχύτητα ρεύματος 2.3 m/s. Η ιδιαιτερότητα της κατασκευής τους έγκειται στο ότι η τοποθέτησή τους γίνεται με αγκίστρωση μίας ογκώδης μεταλλικής δοκού στον πυθμένα. Αυτό κάνει μεταβλητό πολλές φορές το ύψος τους από τη θαλάσσια επιφάνεια απορροφώντας έτσι τη μέγιστη δυνατή ισχύ του ρεύματος. Συνήθως, η συγκεκριμένη τουρμπίνα τοποθετείται σε βάθος μεγαλύτερο των 30 m και δε δημιουργεί κάποια περιβαλλοντική ανησυχία. Μέχρι τώρα, τουρμπίνες αυτού του τύπου έχουν τοποθετηθεί κοντά στις βόρειες ακτές της Σκωτίας.

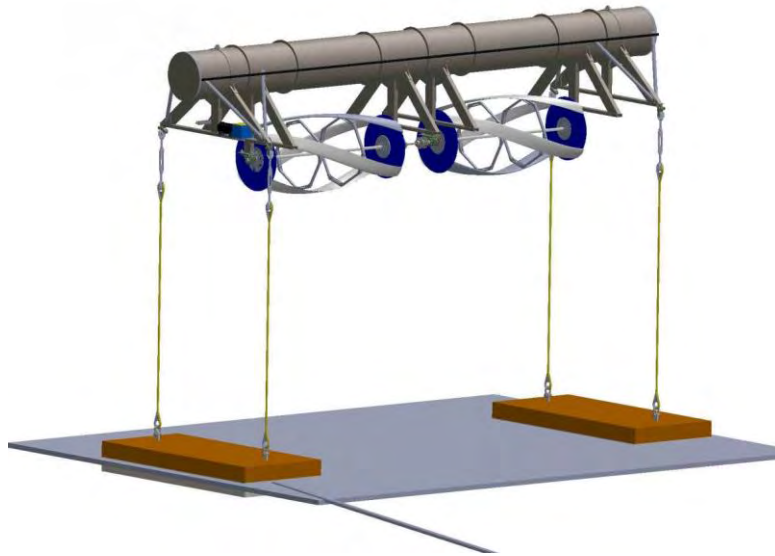


Εικόνα 6.3: Μοντέλο της υδατογεννήτριας TidEl της εταιρίας SMDHydrovision. Πηγή: <http://www.reuk.co.uk/OtherImages/SMB-TidEl-tidal-turbines.jpg>

OCGen

Το συγκεκριμένο σύστημα παλιρροϊκού υδροστροβίλου αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια από την εταιρία OPRC και είναι σχεδιασμένο για τα παλιρροϊκά ρεύματα μίας θαλάσσιας περιοχής περίπου 25 χιλιόμετρα μακριά από της ανατολική ακτή της πολιτείας της Φλόριντα στις Η.Π.Α. Τα ρεύματα εκεί είναι συνεχή και μονής κατεύθυνσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες παραγωγής ηλεκτρισμού. Είναι εγκάρσιας ροής (η ροή εισέρχεται δηλαδή κάθετα στον άξονα περιστροφή του στροβίλου) και πρόκειται επί της ουσίας για μία παραλλαγή της τουρμπίνας τύπου Darrieus (όμοια με αυτή που είχε κάνει ο Alexander M. Gorlov), καθώς βασίζεται στις ίδιες αρχές λειτουργίας με τροποποιημένη –εν προκειμένω- ελικοειδή μορφή των πτερυγίων. Η τροποποίηση αυτή έχει ως στόχο την καλύτερη και αμεσότερη εκμετάλλευση των υπάρχοντων ρευμάτων. Για τυπικές διαστάσεις 12m ύψος και 18m μήκος, το OCGen έχει μία ισχύ 1 MW σε ταχύτητα ρεύματος 3 m/s, που είναι και η μέγιστη επιτρεπόμενη βάσει εργοστασιακής διατάξεως, ενώ η ελάχιστη επιτρεπόμενη είναι 1 m/s.

Η υδατογεννήτρια μένει υποθαλάσσια με αγκίστρωση βάρους στον πυθμένα, σε βάθη μερικών δεκάδων μέτρων ενώ η μάζα μίας τέτοιας κατασκευής ανέρχεται σε μερικούς εκατοντάδες τόνους.

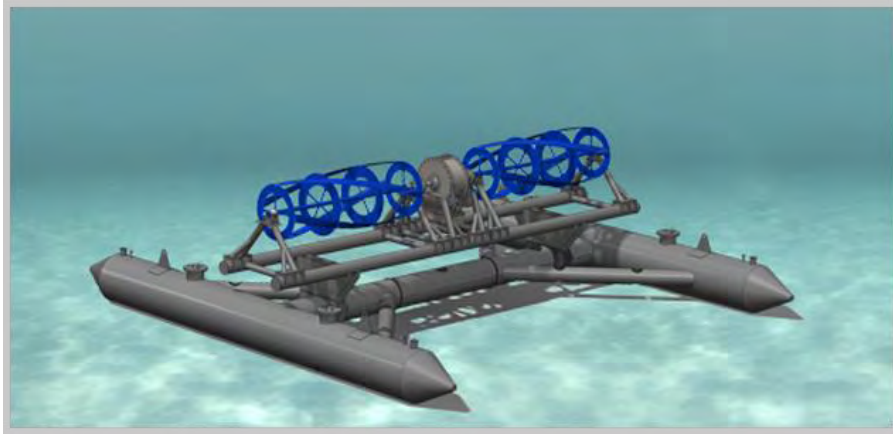


Εικόνα 6.4: Μοντέλο του υδροστροβίλου OCGen. Πηγή:
<http://greenenergymaine.com/sites/default/files/ORPCPrototypeOCGenDevice.jpeg>

Παρόμοιες κατασκευές της ίδιας εταιρίας, κυρίως για παλιρροϊκές εφαρμογές σε μεγάλα βάθη ποταμών, είναι οι υδατοστρόβιλοι TidGen και RivGen. Μία τουρμπίνα TidGen (τοποθετημένη σε ένα σχετικά μεγάλο βάθος) μπορεί να παράξει περί τα 600 KW και συνηθέστερη είναι η συστοιχία τεσσάρων τέτοιων στροβίλων στην ίδια διάταξη. Από την άλλη, μία τουρμπίνα RivGen υπολογίζεται ότι μπορεί να αποδώσει 35 KW σε ένα ρεύμα 2.25 m/s και η μέγιστή της απόδοση ανέρχεται στα 50 KW. Ανάλογα τις ανάγκες σχεδιασμού, μία διάταξη μπορεί να αποτελείται από συστοιχίες αυτών των υδατοστροβίλων. Σε αντίθεση με το OCGen, τόσο το TidGen όσο και το RivGen στηρίζονται σε μεταλλικές βάσεις τοποθετημένες στο βυθό πάνω στις οποίες βρίσκονται τριγωνικά υποστηλώματα.



Εικόνα 6.5: Ο παλιρροϊκός υδροστρόβιλος TidGen.
Πηγή: http://www.orpc.co/newsevents_photogalleryDetails.aspx?Aid=7vWHuJea%2BLw%3D



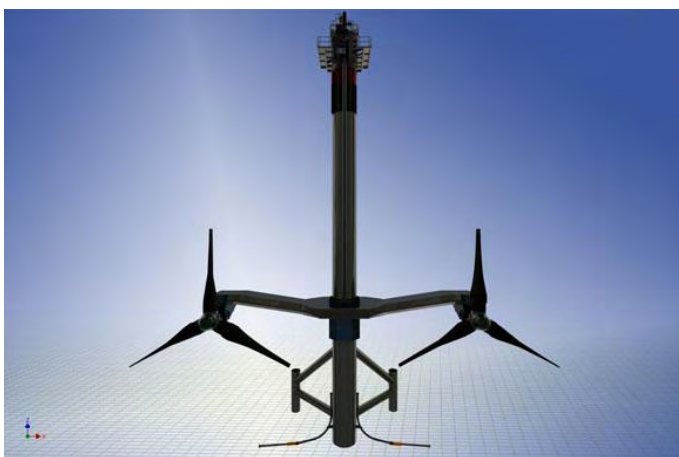
Εικόνα 6.6: Ο παλιρροϊκός υδροστρόβιλος RivGen. Πηγή: <http://greenenergymaine.com/blog/water-power-posts/tidal-power-technology-be-applied-rivers>

SeaGen

Αναπτύχθηκε από τη βρετανική εταιρία MCT και ήταν ο πρώτος παλιρροϊκός υδατοστρόβιλος τέτοιων διαστάσεων στην παγκόσμια αγορά. Εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά 400 m περίπου από την ακτή, στην περιοχή StrangfordLough της Βορείου Ιρλανδίας, στα μέσα του 2008. Αποτελείται από μία τεράστια ράβδο, η οποία στα άκρα της διαθέτει δύο επιμέρους πανομοιότυπους υδατοστροβίλους αξονικής ροής. Η ράβδος είναι προσαρμοσμένη σε μία μεγάλη πλατφόρμα μέσω της οποίας μπορεί να μεταβάλλεται το βυθομετρικό της ύψος, αλλά και να εξέρχεται για διάφορες διορθώσεις και συντηρήσεις. Ο δρομέας του καθενός αποτελείται από δύο πτερωτές, έχει διάμετρο 16 m και ο μέσος συντελεστής απόδοσης ισχύος ανέρχεται στο 48%. Το βάρος του συνόλου της εγκατάστασης ανέρχεται γύρω στους 1000 tn. Κατά μέσο όρο, η απόδοση ανέρχεται στα 1.2MW σε μία ταχύτητα ρεύματος ελαφρώς πάνω από τα 2 m/s. Εξέλιξη αυτής της τουρμπίνας ήταν το SeaGen S. Κύρια σημεία διαφοροποίησης του νέου αυτού σχεδιασμού ήταν η εισαγωγή μίας τρίτης πτερωτής στο δρομέα και η αύξηση της διαμέτρου του από 16 σε 20 m. Επίσης, σημαντική παράμετρος στο βελτιωμένο μοντέλο του SeaGen ήταν η δυνατότητα περιστροφής των πτερωτών του δρομέα κατά 180°, έτσι ώστε ο στρόβιλος να ανταποκρίνεται καλύτερα στην αλλαγή διεύθυνσης των παλιρροϊκών ρευμάτων. Σε συνδυασμό με ρευστοδυναμικές και άλλες μηχανολογικές βελτιώσεις, η MCT κατάφερε να αυξήσει την ισχύ στα 2 MW για ρεύματα άνω των 2.4 m/s και θαλάσσια βάθη που ξεπερνούν τα 38 m.



Εικόνα 6.7: Υδατοστρόβιλος τύπου SeaGen. Πηγή: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQJLSGMXOGRzW9o1UujDeltXIm8WJfPuiqQfJHR0WXEeeAvmaF1>



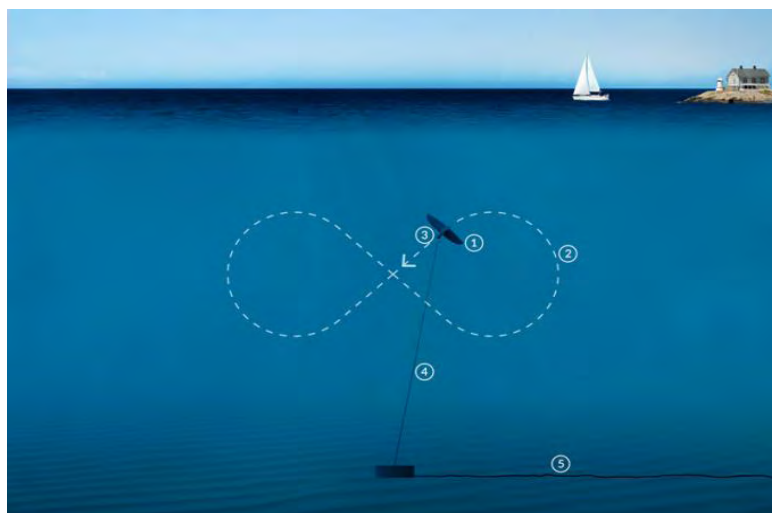
Εικόνα 6.8: Υπολογιστικό μοντέλο υδροστρόβιλου SeaGenS, όπου είναι προφανείς οι βελτιώσεις που έχει υποστεί το μοντέλο του SeaGen.

Πηγή: http://www.marineturbines.com/sites/default/files/ThreeBladesTechnologyDevelopment_SeagenS.jpg

DeepGreen

Πρόκειται για μία αρκετά πρωτότυπη κατασκευή παλιρροϊκού στροβίλου αξονικής ροής, η οποία αναπτύχθηκε από την εταιρία Minesto. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης συσκευής έγκειται στις μικρές διαστάσεις της, όπως και στην ύπαρξη πτερυγίου πάνω από το δρομέα. Το πτερύγιο λειτουργεί σαν «πλοηγός» της γεννήτριας καθώς εκμεταλλευόμενο την υπάρχουσα άνοση, διαβαθμίζει τη συσκευή στην κατάλληλη βαθομετρική θέση, προκειμένου να υπάρξει η μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύος. Αυτό προσφέρει στο DeepGreen ένα τεράστιο βαθομετρικό εύρος λειτουργίας, κάνοντάς το λειτουργικό σε βάθη από 60 έως και πάνω από 120 m. Η στερέωσή του στο βυθό γίνεται με αγκίστρωση μεταλλικών αλυσίδων σε μεγάλης μάζας βαρίδια. Παρακάτω παρατίθενται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά της τουρμπίνας.

<i>μέση παραγόμενη ισχύς</i>	0.5 MW
<i>ταχύτητα θαλάσσιου ρεύματος</i>	1.2-2.4 m/s
<i>βάθος λειτουργίας</i>	60-120 m
<i>μήκος πτερυγίου</i>	12 m
<i>διάμετρος δρομέα</i>	1.5 m
<i>μήκος ατράκτου</i>	9 m
<i>διάμετρος ατράκτου</i>	0.9 m
<i>μήκος αλυσίδας αγκίστρωσης</i>	80-120 m
<i>καθαρό βάρος τουρμπίνας</i>	10 tn



Εικόνα 6.9: Σχεδιάγραμμα τροχιάς του DeepGreen.

Πηγή:http://minesto.com/sites/default/files/styles/two_column_width_no_scale/public/function_no-text_figures_only.png?itok=ePPnw7nt

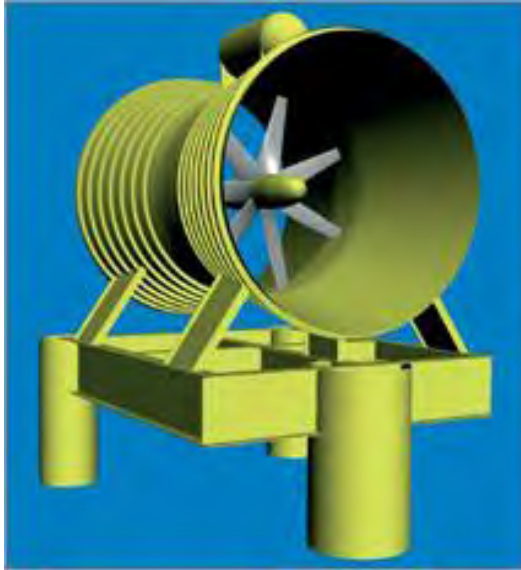


Εικόνα 6.10: Ο υδατοστρόβιλος DeepGreen. Πηγή: <https://subseaworldnews.com/wp-content/uploads/2013/09/Minesto-Looks-at-Wales-for-Deployment-of-Its-Marine-Power-Plant-Deep-Green.jpeg>

LunarTidalTurbine (LTT)

Ο LTT αναπτύχθηκε από την εταιρία Lunar Energy και είναι παρεμφερούς λειτουργίας με τη Beluga 9, για την οποία έγινε λόγος σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Είναι στρόβιλος αμφίδρομης αξονικής ροής, εντός ενός συμμετρικού αγωγού τύπου Venturi. Η ύπαρξη του αγωγού επιταχύνει το εισερχόμενο θαλάσσιο ρεύμα, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας. Επίσης, η διάταξη του αγωγού είναι τέτοια ώστε να μην είναι αναγκαία η τοποθέτηση του δρομέα κάθετα ακριβώς στο παλιρροϊκό ρεύμα, καθώς ο αγωγός πέρα από επιτάχυνση προσφέρει και τον κατάλληλο προσανατολισμό. Οι συμμετρικές πτέρυγες του είναι σχεδιασμένες ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί εξίσου ένα ρεύμα οποιασδήποτε κατεύθυνσης, κάτι που είναι σημαντικό αν ληφθεί υπόψιν η λειτουργία του παλιρροϊκού φαινομένου. Η συντήρηση ή η επισκευή των πτερωτών του δρομέα παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς πραγματοποιείται εύκολα, αφού ο δρομέας βρίσκεται ενσωματωμένος σε μια βάση η οποία είναι συναρμολογούμενη στο υπόλοιπο σώμα του υδροστρόβιλου. Παρακάτω παρατίθενται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά της τουρμπίνας.

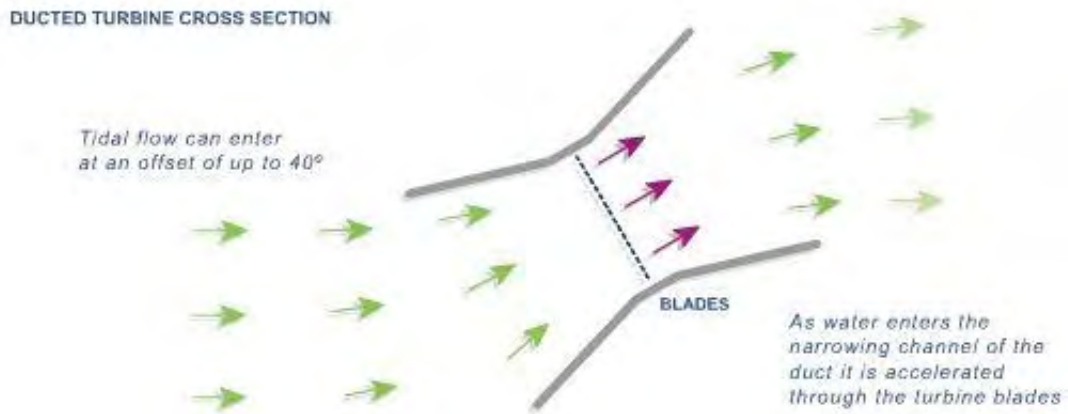
<i>διάμετρος αγωγού</i>	21 m
<i>διάμετρος πτερωτής</i>	11.5 m
<i>απόσταση από τον πυθμένα</i>	10 m
<i>μήκος αγωγού</i>	27 m
<i>συνολικό ύψος</i>	περίπου 31 m
<i>εκτιμώμενη ισχύς</i>	1 MW (στα 2.55 m/s)
<i>βάθος</i>	30-50 m
<i>κατώτατη ταχύτητα</i>	1 m/s
<i>βάρος τουρμπίνας</i>	1714 tn.



Εικόνα 6.11: Η τουρμπίνα LunarTidal (LTT). Πηγή: http://keyassets.timeincuk.net/inspirewp/live/wp-content/uploads/sites/20/2014/07/usrlocalwwwadminimagesimageBankhhometporternobackupybwlim-gnewsdeskymblog07_03_21_tidal_turbine.jpg



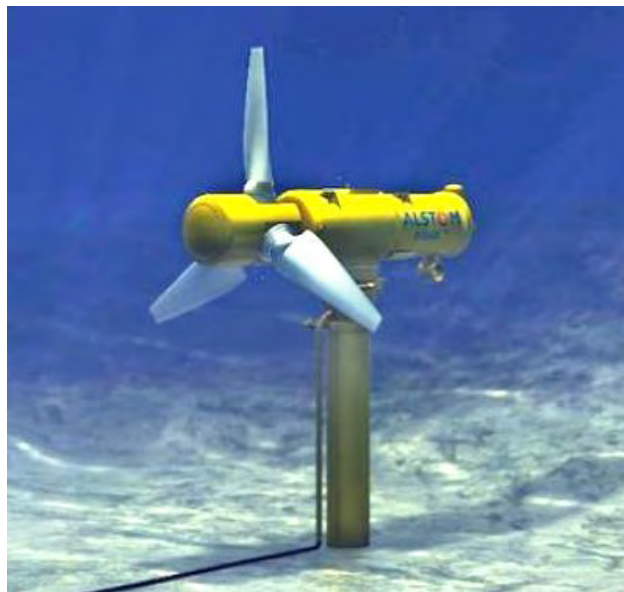
**Εικόνα 6.12: Αποσυναρμολόγηση του δρομέα του στροβίλου.
Πηγή: <http://www.lunarenergy.co.uk/img/atkins-initial-tubular-desi.jpg>**



Εικόνα 41: Σχεδιάγραμμα ροής εντός της τουρμίνας LTT όπου φαίνεται η κλίση 40° στην είσοδο και την έξοδο του αγωγού venturi. (Κονδύλης, 2013)

Oceade 18

Ο συγκεκριμένος υδροστρόβιλος αναπτύχθηκε από την εταιρία General Electric (και μετέπειτα από την Alstom) και έχει τεθεί σε εφαρμογή κοντά στις ιρλανδικές ακτές από το 2013. Ο δρομέας έχει τρεις πτερωτές και διάμετρο μεταξύ 18 και 23 m. Η τουρμπίνα μπορούσε αρχικά να αποδώσει 1 MW ενώ με νεότερες σχεδιαστικές βελτιώσεις φτάνει τα 1.4 MW με μία συχνότητα περιστροφής στα 14 rpm.



Εικόνα 6.13: Ο υδατοστρόβιλος Oceade 18. Πηγή: <http://www.mre-paysdelaloire.com/news/boost-for-tidal-turbine-sector-as-alstom-unveils-oceade-18/>

Κεφάλαιο 7.

Περιβαλλοντικές ανησυχίες

Η παλιρροϊκή ενέργεια φαίνεται –όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια- ιδιαίτερα υποσχόμενη για το μέλλον. Αυτό συμβαίνει διότι οι παλιρροϊκοί υδροστρόβιλοι μπορούν να αποδώσουν μεγάλα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος σε πληθώρα γεωγραφικών σημείων του πλανήτη. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη μείωση της παραγωγής αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς η εκμετάλλευση της παλιρροϊκής ενέργειας (όπως είναι εμφανές άλλωστε) δεν προϋποθέτει την καύση κάποιου ορυκτού ή άλλου καυσίμου για την παραγωγή αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εγκατάσταση της παλιρροϊκής λίμνης (TidalLagoon) στον κόλπο του Swansea της Ουαλίας. Από την εκμετάλλευση της παλίρροιας, παράγεται μέση ισχύς περί τα 320 MW. Σύμφωνα με τους υπεύθυνους της «λίμνης», η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (που ανέρχεται γύρω στις 572 GWh ετησίως) καλύπτει τις ανάγκες περίπου 155.000 βρετανικών οικημάτων. Έτσι, γίνεται εξοικονόμηση σε τεράστιες ποσότητες ορυκτών καυσίμων, αλλά και αποφυγή εκπομπής ρύπων, όπως οξειδίων άνθρακα και αζώτου (CO_x και NO_x) στη ατμόσφαιρα.

Ωστόσο, μία τέτοιου είδους κατασκευή ενδέχεται να δημιουργεί αναταράξεις στα οικοσυστήματα αναφορικά με τη χλωρίδα και πανίδα μίας θαλάσσιας περιοχής.

Καταρχάς, η εγκατάσταση μίας τέτοιας τουρμπίνας στο βυθό μπορεί να γίνει εις βάρος θαλάσσιων φυτικών οργανισμών όπως κοράλια και διάφορα φύκη που μπορεί να προσφέρουν κατάλληλες συνθήκες ζωής σε μεγάλο εύρος ζωικών οργανισμών. Επίσης, η πάκτωση μίας υδρογεννήτριας στο βυθό είναι πιθανό –αν δεν έχει υπάρξει ανάλογος σχεδιασμός- να προκαλέσει εδαφικές ανωμαλίες, οι οποίες με τη σειρά τους θα δημιουργήσουν προβλήματα στην υδρόβια χλωρίδα.

Ως προς την πανίδα, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες γίνονται πιο σύνθετες καθώς σε περίπτωση ύπαρξης αναταράξεων ενός οικοσυστήματος, προκαλείται εύκολα μία ευρύτερη αλυσιδωτή αντίδραση. Σε πρώτη φάση, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος διαταραχής του ιχθυολογικού πληθυσμού, όπως ψάρια, μαλάκια, οστρακοειδή και αρθρόποδα, από τη στιγμή που αλλάζει άρδην ένα κομμάτι του ζωτικού τους χώρου. Έπειτα, (στις θαλάσσιες εγκαταστάσεις) επηρεάζονται τα θαλάσσια κήτη (π.χ φάλαινες, δελφίνια, φώκιες κ.ά) καθώς τροποποιείται η εύρεση βρώσης, όπως και πιθανές θαλάσσιες διαδρομές που ακολουθούν. Σε αυτό έρχεται να προστεθεί και η επιρροή που συντελείται στην

ορνιθολική πανίδα, δεδομένου ότι πολλά είδη πτηνών (π.χ. πελεκάνοι, γλάροι κ.ά.) είναι εξαρτημένα από τη θαλάσσια ζωή και συμπεριφορά.

Ένας, ακόμη, λόγος ανησυχίας είναι η υποβάθμιση του ενεργειακού περιεχομένου ενός ρεύματος. Όταν ένα θαλάσσιο (ή ποταμίσιο) ρεύμα εισέρχεται μέσα από μία υδρογεννήτρια, μεγάλο μέρος της εσωτερικής του ενέργειας απορροφάται από το δρομέα της τουρμπίνας μετατρέπόμενο σε μηχανική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο το ενεργειακό του περιεχόμενο υποβαθμίζεται, καθώς μειώνεται η ενθαλπία του. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει ροϊκές και ενεργειακές μεταβολές του ρεύματος και με τη σειρά του περιβαλλοντικές μεταβολές σε μεγάλο εύρος παράκτιων περιοχών, κυρίως λόγω της θερμοκρασιακής διαφοροποίησης που ενδέχεται να πραγματοποιηθεί και να έχει αντίκτυπο στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 7.1: Αεροφωτογραφία της εγκατάστασης παλιρροϊκής εκμετάλλευσης Tidal Lagoon στον κόλπο της πόλης του Swansea στην Ουαλία. Πηγή: <http://www.capefarewell.com/latest/projects/tidal-lagoon.html>

7.1. Ενεργειακή ανάλυση παλιρροϊκού ρεύματος

Ένα παλιρροϊκό ρεύμα περιέχει ενεργειακό περιεχόμενο (δηλαδή ενθαλπία) που προσδιορίζεται από τη σχέση: $H=U+pV$, όπου H : η ενθαλπία του ρεύματος, U : η εσωτερική του ενέργεια, p : η πίεση του, V : η ογκομετρική του παροχή.

Όπως έχει αναλυθεί από τα ενεργειακά ισοζύγια που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτει ότι δημιουργείται μία αρνητική διαφορά πίεσης:

$$\Delta p = p_2 - p_1 < 0$$

όπου p_1 η πίεση του ρεύματος αρκετά πριν την είσοδό του στο δρομέα και p_2 η πίεσή του αρκετά μετά την έξοδό του.

Εν συνεχεία, διαφορίζεται η σχέση που προσδιορίζει την ενθαλπία ως εξής:

$$dH = dU + d(pV) \Rightarrow dH = Q - W_{vol} + d(pV)$$

$$\Rightarrow dH = Q - p \cdot dV + p \cdot dV + V \cdot dp$$

$$\Rightarrow dH = Q + V \cdot dp$$

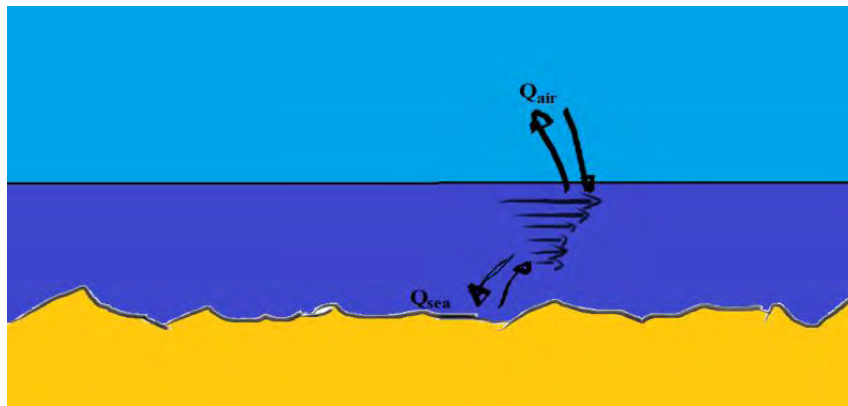
Όπου με Q συμβολίζεται η εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο σύστημα της τουρμπίνας και το τοπικό θαλάσσιο περιβάλλον ενώ με W_{vol} το παραχθέν έργο λόγω ογκομεταβολής.

Αφού δεν υπάρχουν ουσιαστικές εναλλαγές θερμότητας στο σύστημα, θεωρούμε $Q=0$. Οπότε, η ενθαλπία ορίζεται ως $dH = V \cdot dp$. Ολοκληρώνοντας την προηγούμενη σχέση, γίνεται αντιληπτό ότι το ενεργειακό περιεχόμενο υποβαθμίζεται καθώς η ενθαλπία μειώνεται.

$$\int dH = \int V \cdot dp \Rightarrow \Delta H = V \cdot \Delta p \Rightarrow \Delta H < 0$$

Μεταξύ του θαλάσσιου ρεύματος, του υπόλοιπου θαλάσσιου περιβάλλοντος και του ατμοσφαιρικού αέρα συντελούνται συνεχείς εναλλαγές θερμότητας. Κατά την κίνηση του ρεύματος μπορούμε να μελετήσουμε το όλο σύστημα ως έναν εναλλάκτη θερμότητας. Όταν το ρεύμα φτάσει στον τελικό του προορισμό το σύστημα μπορεί να μελετηθεί σε στασιμότητα έως ότου η εναλλαγή θερμότητας παύσει καθώς το σύστημα έρθει σε θερμοδυναμική ισορροπία.

Το ενεργειακό περιεχόμενο της μεταφερθείσας θαλάσσιας μάζας θα είναι μειωμένο κατά ΔH . Αυτό σημαίνει ότι το θερμικό φορτίο που θα εκλυθεί ή θα απορροφηθεί από το υδάτινο και ατμοσφαιρικό περιβάλλον θα είναι μειωμένο, με αποτέλεσμα το θερμοκρασιακό προφίλ παράκτιων περιοχών ενδεχομένως να τροποποιηθεί και αυτό με τη σειρά του να έχει επιπτώσεις στους διάφορους οργανισμούς.



Εικόνα 7.2: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των εναλλαγών θερμότητας μεταξύ του ρεύματος με τον αέρα και το θαλάσσιο περιβάλλον.

Επιπλέον, πτώση της πίεσης ενός θαλάσσιου ρεύματος συνεπάγεται μείωση της μετέπειτα ταχύτητάς του, κάτι που μπορεί να το καταστήσει πιο ευπαθές σε ροϊκές αναταράξεις και να μεταβληθεί πλήρως η ροϊκή του συμπεριφορά. Αυτό, πέρα από επιρροές στη θαλάσσια ζωή, είναι πιθανόν να επηρεάσει παράκτιες περιοχές που δε θα επηρέαζε πρωτύτερα. Επίσης, υπάρχει το ενδεχόμενο να μειωθεί αισθητά το ύψος της πλημμυρίδας σε διάφορα σημεία με αποτέλεσμα να υπάρξουν επιπτώσεις στις ακτές και στο υδάτινο περιβάλλον. Εδώ έρχονται να προστεθούν και οι αναταράξεις που μπορεί να δημιουργήσει το απόρρεμα, η παραχθείσα τύρβη και οι δονήσεις μίας τέτοιας γεννήτριας, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν ανωμαλίες στο βυθό. Απαιτείται κατάλληλος και συντηρητικός σχεδιασμός προκειμένου να μην υπάρξουν τέτοια προβλήματα, ειδικά όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις με πολλαπλές σειρές από τέτοιου είδους τουρμπίνες (Bahaj, 2011). Ωστόσο, η αλήθεια είναι ότι δεν έχουν γίνει αναλυτικές μελέτες στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο, με αποτέλεσμα τα όσα έχουν αναφερθεί να αποτελούν κυρίως θεωρητικές μελέτες (Boehlert & Gill, 2010).

Σε πολλές δομές παλιρροϊκής εκμετάλλευσης μία ενδεδειγμένη λύση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση αντλιών όπου επαναδιοχετεύουν το νερό σε διάφορα σημεία. (Polagye, Kawase, & Malte, 2009)

7.2. Επιρροές στη θαλάσσια ζωή

Η εγκατάσταση μίας παλιρροϊκής υδρογεννήτριας απαιτεί την ύπαρξη πληθώρας άλλων συσκευών και αντικειμένων προκειμένου να τεθεί πλήρως σε λειτουργία. Τέτοια αντικείμενα είναι σημαδούρες, αντλίες, καλωδιώσεις, σωληνώσεις, εξειδικευμένες άγκυρες κ.ά. Έχει παρατηρηθεί σε τέτοιες εγκαταστάσεις, ότι η ύπαρξη τέτοιων δομών στην επιφάνεια της θάλασσας (ή λίμνης) μπορεί να ληφθεί ως οριοθέτηση χώρου από υδρόβιους οργανισμούς και κατά κύριο λόγο από αποδημητικά πτηνά τα οποία στρέφονται σε υδάτινα οικοσυστήματα για εύρεση τροφής αλλά και προσωρινής διαμονής. Αυτό - πολλές φορές- είναι πιθανό να δημιουργήσει αποπροσανατολισμό σε διάφορα είδη όπως τα χελιδόνια ή οι πελαργοί. Λειτουργεί, βέβαια θετικά για ορισμένα είδη υδρόβιων οργανισμών και πτηνών, διότι η οριοθέτηση του χώρου φέρνει στη συγκεκριμένη έκταση νέους θηρευτές όπως κάποιων ειδών αρθρόποδα (π.χ κριλλ) (**Boehlert&Gill, 2010**). Από την άλλη πλευρά, στο βυθό η πλειονότητα των ειδών προσαρμόζεται σε μία νέα διάταξη του φυσικού τους περιβάλλοντος, ενώ σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει αντιδιαβρωτική συντήρηση των μεταλλικών στηρίξεων του βυθού, αυτές μετατρέπονται σε αποικίες μεγάλων πληθυσμών από μαλάκια, φύκη, ψάρια κ.ά. (**Dempster&Taquet, 2004**)

Ωστόσο, η (έστω και στιγμιαία) ύπαρξη ιχθύων ανάμεσα στις πτέρυγες του δρομέα της τουρμπίνας μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά στη γεννήτρια (blade strike). Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η περιστροφή ενός παλιρροϊκού στροβίλου γίνεται σε χαμηλές στροφές (μικρότερες των 20 rpm) και ο κίνδυνος να συμβεί κάτι τέτοιο θεωρείται αμελητέος, ενώ η ηχητική συχνότητα που παράγεται από τη λειτουργία της εγκατάστασης δεν επηρεάζει τους ντόπιους οργανισμούς (**Boehlert&Gill, 2010**). Παλαιότερα, ο παραχθείς ήχος από το ηλεκτρικό δίκτυο της εγκατάστασης προξενούσε δυσφορία και αναταραχή σε θαλάσσια κήτη, με το πρόβλημα αυτό να τείνει εκλείπει τα τελευταία χρόνια (Southall, 2007). Επίσης, είχε παρατηρηθεί ότι η παρουσία ηχητικών σημάτων έλκυε μερικά είδη σολομών. Παρά ταύτα υπάρχει έντονη συζήτηση αναφορικά με τη δημιουργία έντονου θορύβου κατά την κατασκευή και εγκατάσταση μίας τέτοιας δομής στο βυθό και κατά πόσο αυτή επηρεάζει τη πανίδα της περιοχής.

Ο κίνδυνος πραγματοποίησης ενός blade strike είναι ελαφρώς μεγαλύτερος στις ανοιχτές τουρμπίνες καθώς μπορεί πιο εύκολα να γίνει κάποιο ατύχημα, όπως μικροτραυματισμοί που έχουν συμβεί σε κήτη (**Wilson&Batty, 2007**), ενώ απαιτείται

περαιτέρω προσοχή στο σχεδιασμό εάν η γεννήτρια είναι σε σημείο με έντονη ναυτιλιακή δραστηριότητα. Η υποβάθμιση του ενεργειακού περιεχομένου ενός ρεύματος (άρα και του θερμικού του φορτίου) ίσως επηρεάσει αισθητά τα ωκεάνια είδη ιχθύων όπως και πολλά είδη πλαγκτόν τα οποία ζουν σε θερμά ύδατα (**Harrison, 1987**).

Έντονη ανησυχία είχε δημιουργηθεί στο παρελθόν σχετικά με τη διάλυση βαρέων μετάλλων στα υδάτινα οικοσυστήματα, όπως και τις χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνταν για την αποφυγή της διάβρωσης. (**Boehlert&Gill, 2010**) Με την πάροδο των χρόνων υπήρξε κατάλληλη ανάπτυξη βαφών επιβραδυντικών στη διάλυση επιβλαβών στοιχείων στο νερό μειώνοντας παράλληλα με αυτόν τον τρόπο την ανάπτυξη διάβρωσης.

Είναι γεγονός ότι γύρω από τέτοιου είδους εγκαταστάσεις η αλιευτική δραστηριότητα μειώνεται αισθητά και κάποιες φορές μηδενίζεται. Αυτό το φαινόμενο μπορεί όχι μόνο να αντισταθμίσει τις όποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υδρογεννητριών, αλλά και να δημιουργήσει αρκετά μεγάλα ιχθυολογικά αποθέματα στις περιοχές γύρω από αυτές. Αυτό με τη σειρά του θα συγκεντρώσει στην περιοχή θηρευτές (ψάρια και θηλαστικά), οπότε ενδέχεται να δημιουργηθούν τελείως νέες περιβαλλοντικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή (**Boehlert&Gill, 2010**).

Όσον αφορά τα θαλασσοπούλια (όπως οι πελαργοί), η επιρροή που ασκείται από τέτοιες εγκαταστάσεις έγγειται στο κατά πόσο μπορεί να τους στοιχίσει ένας μερικός αποπροσανατολισμός. Όπως ειπώθηκε πρωτύτερα, μία τέτοια εγκατάσταση μπορεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα να αποπροσανατολίσει κάποια πτηνά από τον προορισμό τους. Αυτό θα έχει άμεση συνέπεια στην καταναλωθείσα –από τα ίδια- ενέργεια, καθώς είναι λογικό τα ενεργειακά τους αποθέματα να μειωθούν σημαντικά και να μην έχουν αντοχή έπειτα για εύρεση τροφής αλλά και εκ νέου της πορείας τους. Σύμφωνα με μελέτες, συνήθως κάτι τέτοιο δε συμβαίνει διότι σε περίπτωση αποπροσανατολισμού, μπορούν σχετικά εύκολα να ανακάμψουν και να συνεχίσουν το ταξίδι τους (**Harrison, 1987**).

Από την άλλη πλευρά, τα θαλάσσια κήτη έχουν κινδύνους λόγω του τεράστιου μεγέθους του να εμπλακούν στις δομές μίας τέτοιας εγκατάστασης (π.χ σε καλώδια και μεταλλικά δικτυώματα) και έτσι να δημιουργηθούν ζημιές αλλά και τα ίδια να τραυματιστούν. Επιπλέον, οι ηχητικές συχνότητες που δημιουργούνται στις δομές της γεννήτριας είναι ικανές να τα απωθήσουν από μία ευρύτερη περιοχή ή να τα έλξουν, βγάζοντάς τα έτσι από την πορεία τους, δημιουργώντας τους σύγχυση, διαταράσσοντας έτσι την πληθυσμιακή δομή θαλάσσιων περιοχών (**Wilson&Batty, 2007**).



Εικόνα 7.3: Σμήνος από θαλασσοπούλια βουτάνε στη θάλασσα για να πιάσουν ψάρια. Πηγή: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTFwcUWeJ5KZt45T0B76YYJw81LHTfdcFRZ_jQjGJxSrQUV9vVgMw



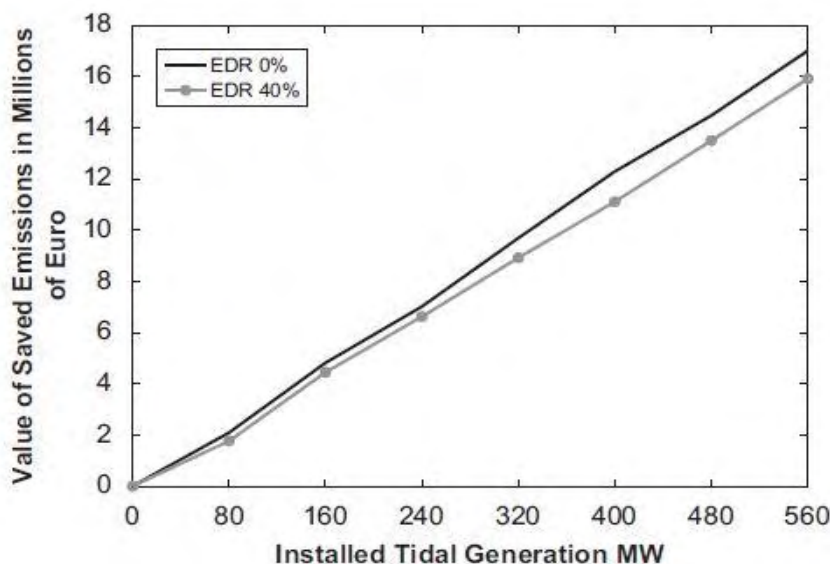
Εικόνα 7.4: Κοπάδι θαλάσσιων κητών (δεελφίνια) ακολουθώντας συγκεκριμένη πορεία. Πηγή: <http://https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTsILEkt5EJl6IHCqiSFaA5AroFdG7LUtajfs8OavZsWvTDMI2m>

7.3. Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση της παλιρροϊκής δραστηριότητας συνεπάγεται την έλλειψη καύσης ορυκτών καυσίμων όπως ο λιγνίτης και το πετρέλαιο και επομένως τη μη έκλυση στην ατμόσφαιρα ρύπων όπως οξειδίων του άνθρακα (CO_x), του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x). Το μεγαλύτερο μερίδιο στην έκλυση ρύπων καταλαμβάνει αυτή του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Υπολογίζεται ότι ισχύς 560 MW, παραγόμενη από την εκμετάλλευση της παλιρροϊκής δραστηριότητας σε περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου και της Ιρλανδίας, έχει αποτρέψει την έκλυση στην ατμόσφαιρα 501.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό ισοδυναμεί με μία -κατά προσέγγιση- μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων κατά 470 g/KWh. (Denny, 2009)

Οι τιμές των ρύπων το 2006 εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης διαμορφώνονταν στα 30, 150 και 3000 €/tn για τα CO₂, SO₂ και NO_x, αντίστοιχα. Συνεπώς, η στροφή στις εναλλακτικές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναδεικνύει την παλιρροϊκή τεχνολογία ως ένα μέσο για τη μείωση των χρηματικών εξόδων από τις εταιρίες ηλεκτρισμού. Για τις ίδιες περιοχές που αναφέρθηκαν προωτέρω, σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει για τα δεδομένα του Ηνωμένου Βασιλείου και της Ιρλανδίας, έχει υπάρξει εξοικονόμηση καυσίμων που αντιστοιχεί σε ενεργειακό περιεχόμενο περί των 5·10⁶ GJ κατανάλωσης φυσικού αερίου και 2·10⁶ GJ κατανάλωσης πετρελαίου (Denny & O'Malley, 2007).

Επιπλέον, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.3, με τη διαρκή αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, υπήρξε σταθερή εξοικονόμηση εκατομμυρίων ευρώ έως τώρα για να φτάσει μέχρι σήμερα να έχουν εξοικονομηθεί συνολικά γύρω στα 17 εκατομμύρια ευρώ, τα οποία σε διαφορετική περίπτωση θα δίνονταν στην επιβολή περιβαλλοντικών φόρων και προστίμων προς τους κρατικούς μηχανισμούς του Ηνωμένου Βασιλείου, της Ιρλανδίας αλλά και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτό αναδεικνύει καλύτερα την οικονομική και ενεργειακή πτυχή των παλιρροϊκών στροβίλων ως μία λύση ενδεχομένως αρκετά προσοδοφόρο.



Εικόνα 7.5: Διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η αύξηση των εξοικονομημένων χρηματικών πόρων ως συνάρτηση της αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος παλιρροϊκής εκμετάλλευσης. (Denny, 2009)

Κεφάλαιο 8. Παλιρροϊκή ενέργεια στον Ελλαδικό χώρο

Η εκμετάλλευση παλιρροϊκής ενέργειας στα ελληνικά θαλάσσια ύδατα είναι αρκετά περιορισμένη καθώς το φαινόμενο της παλίρροιας δεν εμφανίζεται σε πληθώρα σημείων και ρευμάτων με μεγάλη ταχύτητα τα οποία μπορούν να κριθούν ως αξιοποιήσιμα. Ωστόσο, υπάρχουν δύο περιοχές ανά την Ελλάδα οι οποίες προσφέρονται για εκμετάλλευση της παλίρροιας και για τις οποίες θα γίνει εκτενής λόγος παρακάτω. Αυτές είναι ο πορθμός του Ευρίπου και το στενό Ρίου-Αντιρρίου.

8.1. Πορθμός του Ευρίπου

Η θαλάσσια ροή στον πορθμό του Ευρίπου στην Εύβοια υπήρξε αιτία προβληματισμού από την αρχαιότητα καθώς έχει την ιδιαιτερότητα οι υδάτινες μάζες να κινούνται συνεχώς ενώ ταυτόχρονα αλλάζουν κατεύθυνση άλλοτε προς το βόρειο Ευβοϊκό κόλπο και άλλοτε προς τη νότια πλευρά του κόλπου. Η εξήγηση του φαινομένου δίνεται πλήρως από τον αστρονόμο και ακαδημαϊκό Δημήτριο Αιγινίτη το 1929. Η εξήγηση που έδωσε είναι η εξής (**Eginitis, 1929**):

Το παλιρροϊκό κύμα δημιουργείται από την έλξη της Σελήνης στην Ανατολική Μεσόγειο και κατευθύνεται προς τα δυτικά. Όταν φθάνει στο νότιο Αιγαίο, κατευθύνεται βόρεια και φθάνει στις ανατολικές ακτές της Εύβοιας τρεις ώρες περίπου μετά τη στιγμή που κατά την οποία η Σελήνη διέρχεται από το μεσημβρινό της Χαλκίδας. Για αυτόν το λόγο το εισέρχον κύμα στο Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο φθάνει στο στενό του Ευρίπου 1.25 ώρες νωρίτερα από το κύμα που φθάνει από το βορρά, καθώς η διαδρομή που ακολουθεί είναι μικρότερη. Ο όγκος του θαλάσσιου ύδατος του νοτίου κύματος είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο όγκο του βόρειου κύματος, εφόσον το τελευταίο εισέρχεται από τη στενή βόρεια είσοδο του Βορείου Ευβοϊκού κόλπου στην περιοχή των Ωρεών.

Έτσι, οι περισσότεροι υδάτινοι όγκοι φθάνουν από τα νότια νωρίτερα, ανεβάζοντας τη στάθμη στο μέρος εκείνο κατά 30-40 εκατοστά και συνεπώς να γεννάται το ρεύμα από τα νότια προς τα βόρεια. Έπειτα από 6 ώρες οι συνθήκες αντιστρέφονται γιατί ταυτόχρονα φθάνει στο στενό το κύμα που μπήκε στο Βόρειο Ευβοϊκό Κόλπο και έτσι ανεβαίνει η στάθμη στο βόρειο μέρος του στενού με αποτέλεσμα να αντιστρέφεται στη συνέχεια η κατεύθυνση του ρεύματος.

Κατά την εποχή του πρώτου και τελευταίου τετάρτου της Σελήνης οι παλίρροιες δεν είναι έντονες και επομένως και τα κύματα που εισέρχονται στους δύο κόλπους είναι εξασθενημένα. Όλα αυτά προστίθενται στη μορφολογία των ακτών, του βυθού και της φοράς των ανέμων, με αποτέλεσμα η ροή των υδάτων να είναι εντελώς ακανόνιστη.

Ο πορθμός του Ευρίπου έχει πλάτος και μήκος περί τα 40 μέτρα, ενώ το βάθος του κυμαίνεται στα 8.5 μέτρα. Σύμφωνα με νεότερες μετρήσεις, η μέση ταχύτητα των ρευμάτων είναι αρκετά υψηλή όντας κατά μέσο όρο μεταξύ 2.7 και 3 m/s. Κατόπιν, συστηματικών παρατηρήσεων διαπιστώθηκε ότι 22 με 23 ημέρες κάθε μήνα το ρεύμα παρουσιάζει μια κανονικότητα και αλλάζει φορά κάθε 6 ώρες περίπου, με αποτέλεσμα να συμπληρώνει τέσσερις εναλλαγές κάθε 24 ώρες και 50 λεπτά όπως ακριβώς η παλίρροια (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2010) .

Τα παραπάνω δεδομένα αναδεικνύουν τη συγκεκριμένη περιοχή ως πολύ πιθανά αξιοποιήσιμη. Είναι αναγκαία, βέβαια, η ύπαρξη και ανάλυση ενδεδειγμένων μελετών που ανταποκρίνονται στην ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου θαλάσσιου στενού, διότι το χαμηλό βάθος και η συνεχής εναλλαγή κατεύθυνσης να αποτελούν ενδεχομένως προβλήματα στην υλοποίηση μίας εγκατάστασης παλιρροϊκών υδροστροβίλων. Η απάντηση σε κάτι τέτοιο θα μπορούσαν να είναι συστοιχίες υδροστροβίλων μικρών διαστάσεων με αυτοματισμό προκειμένου να αλλάζει η διεύθυνση των πτερυγίων του δρομέα ώστε να αξιοποιείται κατάλληλα η εναλλαγή κατεύθυνσης των ρευμάτων. Επίσης, μία τέτοια εγκατάσταση θα πρέπει να ολοκληρωθεί σε τέτοιο σημείο ώστε να μην είναι εμπόδιο στη ναυτιλία και την αλιεία.



Εικόνα 8.1: Ο πορθμός του Ευρίπου. (Πηγή: <https://i.ytimg.com/vi/IPM4K8W7wKQ/maxresdefault.jpg>)



Εικόνα 8.2: Η γεωγραφική θέση του Ευρίπου στον ελλαδικό χώρο.

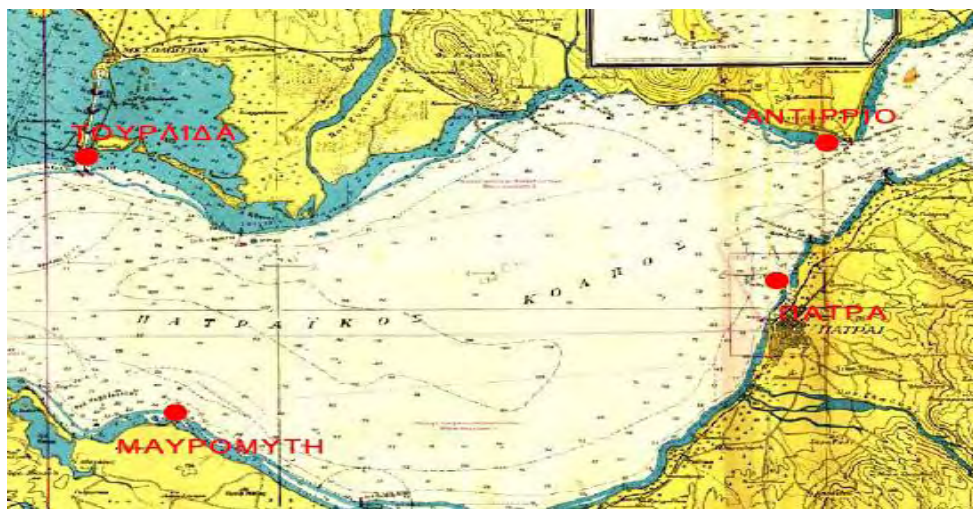
Πηγή: <http://www.newsbeast.gr/files/1/2016/12/seism-353x221.jpg>

8.2. Στενό Ρίου- Αντιρρίου

Το συγκεκριμένο στενό βρίσκεται ανάμεσα στη Στερεά Ελλάδα και την Πελοπόννησο. Έχει πλάτος 2.2 km, μέγιστο βάθος 65 m και διατομή 81500 m², συνδέει τον Πατραϊκό κόλπο με τον όρμο της Ναυπάκτου, ενώ ο τελευταίος οδηγεί στον Κορινθιακό κόλπο. Παρουσιάζει έντονη παλιρροϊκή δραστηριότητα αλλά με ταχύτητες θαλάσσιων ρευμάτων σε σχετικά χαμηλά μεγέθη, ενώ η βαθυμετρία του πυθμένα κυμαίνεται στο μεγαλύτερο μέρος της θαλάσσιας περιοχής μεταξύ 55 με 65 μέτρα (**Φουρνιώτης, 2009**). Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει, η μέγιστη ταχύτητα των ρευμάτων φτάνει τα 3.6 m/s, ωστόσο η μέση ταχύτητα ρεύματος κυμαίνεται γύρω στο 1.5 m/s, κάτι που περιορίζει αισθητά την αξιοποίηση του παλιρροϊκού φαινομένου (**Κονδύλης, 2013**). Ίσως, το πιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης θαλάσσιας περιοχής είναι η έντονη ποικιλομορφία του πυθμένα στα διάφορά του σημεία, κάτι που μπορεί να είναι αρνητικός παράγοντας στη διαδικασία μίας ευρύτερης εγκατάστασης παλιρροϊκών υδροτροβίλων. Επίσης, το εύρος της παλιρροϊκής δραστηριότητας στη θαλάσσια περιοχή είναι ακανόνιστο. Για παράδειγμα, στην περιοχή της Μαυρομούτης το ελάχιστο εύρος είναι 6 cm και το μέγιστο εύρος 35,5 cm. Στην Τουρλίδα, το ελάχιστο εύρος είναι 6 cm και το μέγιστο εύρος είναι 30,5 cm. Στο Αντίρριο το εύρος είναι 10-51,5 cm. Στην Πάτρα, το εύρος είναι 9-40 cm. Το εύρος μεταβάλλεται σύμφωνα με την σχετική θέση του Ήλιου, της Σελήνης και της Γης. Έχουμε το συμπέρασμα ότι όσον αφορά την περίοδο, στον κόλπο της Πάτρας η παλίρροια είναι ημι-ημερήσιου τύπου καθώς σχηματίζει από δύο φορές πλημμυρίδα και άμπωτη το 24ωρο (**Φουρνιώτης, 2009**).

	20m	25m	30m	40m
Μέση Ταχύτητα Ρεύματος (m/s)	1,569	1,540	1,490	1,256
Μέση Πυκνότητα Ισχύος (KW/m^2)	1,930	1,827	1,653	1,000
Εμβαδό Διατομής του τμήματος της περιοχής μελέτης του Στενού (m^2)	2.500	2.500	2.500	2.500
Συνολική Ισχύς Υδατικού Πόρου (MW)	9	8,5	7,7	4,6
Συνολική Ισχύς της περιοχής μελέτης του Στενού (MW)	29,8			

Εικόνα 8.3: Πίνακας με συγκέντρωση ρευστομηχανικών αποτελεσμάτων κατόπιν μετρήσεων σε σημεία του πορθμού μεταξύ Ρίου και Αντιρρίου. (Κονδύλης, 2013)



Εικόνα 8.4: Χάρτης του Πατραϊκού κόλπου στον οποίο φαίνεται η γεωγραφική θέση του θαλάσσιου στενού ανάμεσα στο Ρίο και το Αντίρριο. (Φουρνιώτης, 2009)

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία μελετήθηκαν αναλυτικά όλες οι πτυχές του κλάδου των παλιρροϊκών στροβίλων. Στα διάφορα κεφάλαια, παρουσιάστηκε ενδελεχώς γιατί μία τέτοια συσκευή μπορεί να κριθεί επιθυμητή για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι κυριότεροι λόγοι είναι το χαμηλό κόστος που απαιτείται για την κατασκευή και λειτουργία μίας τέτοιας ενεργειακής εγκατάστασης και η περιβαλλοντική της φιλικότητα καθώς η απουσία καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας την καθιστά μη ρυπογόνο. Επιπλέον, προέκυψε το συμπέρασμα ότι πιο ευρέως διαδεδομένοι είναι οι αξονικοί υδροστρόβιλοι καθώς ανταποκρίνονται καλύτερα στην αξιοποίηση της ροής υδάτινων μαζών. Οι ακτινικοί υδροστρόβιλοι προϋποθέτουν πολλές φορές εξειδικευμένη εγκατάσταση για τη διεύθυνση της ροής προς αυτούς ενώ όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουν κύρια εφαρμογή σε ποταμούς και σπανιότερα σε λίμνες, κάτι που τους κάνει περιορισμένης αξιοποίησης. Η έντονη παρουσία παλίρροιας σε διάφορες περιοχές του κόσμου δημιουργεί πολλές φορές την έντονη παρουσία ρευμάτων άρα και ευνοϊκών συνθηκών για την ενεργειακή εκμετάλλευση των υδάτινων μαζών σε λίμνες, ποτάμια και κυρίως θαλάσσιες περιοχές. Ωστόσο, μία τέτοια εκμετάλλευση δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχει και πλήθος περιβαλλοντικών παραγόντων που μπορεί να αναδείξει την εγκατάσταση ενός παλιρροϊκού στροβίλου (ή μίας συστοιχίας τέτοιων υδρογεννητριών) πλήρως ή μερικώς ακατάλληλη. Στα ελληνικά εγχώρια θαλάσσια ύδατα η παρουσία του παλιρροϊκού φαινομένου είναι μικρής έκτασης με κυριότερα σημεία παλιρροϊκής δραστηριότητας τις περιοχές του πορθμού του Ευρίπου και του στενού Ρίου-Αντιρρίου. Οι περιοχές αυτές είναι υδρολογικά ιδιαίτερα αξιοποιήσιμες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε περίπτωση αμελητέας περιβαλλοντικής επιρροής, η εγκατάσταση τέτοιων υδρογεννητριών μπορεί να κριθεί αρκετά ωφέλιμη για τις ευρύτερες γεωγραφικές περιοχές των σημείων αυτών.

Για την υδρολογικά ενεργειακή εκμετάλλευση των περιοχών αυτών, θα μπορούσε να γίνει πληθώρα μελετών τεχνικού-οικονομικού, ρευστοδυναμικού και περιβαλλοντικού περιεχομένου. Υπάρχουν πάρα πολύ υδροστρόβιλοι οι οποίοι θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή σε αυτά τα γεωγραφικά σημεία, έχοντας γίνει για αυτές μελέτες αναφορικά με την οικονομική τους βιωσιμότητα και σε τι χρονικό διάστημα σε μία τέτοια εγκατάσταση

θα γινόταν απόσβεση του κόστους κατασκευής. Σε περίπτωση σχεδιασμού ενός νέου στροβίλου κατάλληλα διαμορφωμένου για τα υδρολογικά δεδομένα των συγκεκριμένων πορθμών ρευστομηχανικές μελέτες θα κρίνονταν απαραίτητες ενώ στην περίπτωση εγκατάστασης ενός ήδη υπάρχοντα στροβίλου του εμπορίου μία υπολογιστική ρευστομηχανική μελέτη θα μπορούσε να αναδείξει κατά πόσο επαληθεύονται οι ήδη υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις. Αυτό μπορεί να γίνει, όπως αναφέρθηκε προωύτερα, με τη χρήση του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS στο οποίο μπορεί να γίνει προσομοίωση ροών γύρω γύρω από πτερωτές στροβιλομηχανών από την οποία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τα ρευστομηχανικά μεγέθη με κυριότερο ενδιαφέρον σε αυτό της διαφοράς πίεσεως, βάσει του οποίου διακρίνουμε τα μεγέθη της παραχθείσας μηχανικής ισχύος. Επίσης, πάντοτε μία μελέτη στην οποία θα απαριθμούνταν και θα αναλύονταν τα περιβαλλοντικά ζητήματα πρέπει πάντοτε να επιτελείται προκειμένου να μπορεί ένας μηχανικός να αποφανθεί αν είναι οικολογικά βιώσιμη μία εγκατάσταση ενός παλιρροϊκού υδροστροβίλου.

Βιβλιογραφία

Abu-Shark, S. M. (2002). Performance of an integrated water turbine PM generator. *IEE International Conference on Power Electronics, Machines and drives* (σσ. 486-489). Milwaukee: University of Southampton.

Bahaj, A. S. (2011). *Generating electricity from the oceans*. Southampton: University of Southampton.

Bahaj, A. S., & Myers, L. E. (2003). *Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production*. Southampton: University of Southampton.

Bahaj, A. S., & Myers, L. (2005). *Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in Aldernay Race*. Southampton: University of Southampton.

Baker, A. (1991). *Tidal Power*. London: Peter Pelegrinus Ltd.

Batten, W. J., & Molland, A. F. (2006). *Hydrodynamics of marine current turbines*. Southampton: University of Southampton.

Bernshtein, L., & Haeyang, Y. (1996). *Tidal power plants*. Seoul: Korea Ocean Research and Development Institute.

Bir, G. S., Lawson, M. J., & Li, Y. (2011). Structural Design of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine Composite Blade. *ASME 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (σσ. 38-39). Rotterdam: National Renewable Energy Laboratory of U.S.A.

Blanden, L., & Bahaj, A. (2006). Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill. *UK. Review Energy* , 121-132.

Boehlert, G. W., & Gill, A. B. (2010). Ecological effects of ocean renewable energy development - A current synthesis. *Oceanography Journal* , 60-72.

Charlier, R. (2007). Forty candles for the Rance river TPP tides provide renewable and sustainable power generation. *Renewable Sustainable Energy Review* , 2032-2057.

Dalhaug, O. G. (2011). *Energy from environmental flows - Lecture notes*. Oslo: Norwegian University of Science and Technology.

- Dempster, T., & Taquet, M. (2004). Fish aggregation device (FAD) research: Gaps in current knowledge and future directions for ecological studies. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* , 21-42.
- Denny, E. (2009). *The economics of tidal energy*. Dublin: Trinity College.
- Denny, E., & O'Malley, M. (2007). A cost benefit analysis of tidal generation. *Ninth IAEE European Energy Conference* (σσ. 605-615). Florence: Elsevier.
- Dixon, S. L. (2005). *Fluid Mechanics - Thermodynamics of Turbomachinery*. Oxford: Pergamon Press Ltd.
- Eginitis, D. (1929). *The problem of the tide of Euripus*. Weinheim: WILEY - VCH Press.
- Fraenkel, P. L. (2005). *Power from marine currents*. London: Marine Current Turbines Limited.
- Fraenkel, P. L. (1998). 'Seaflow': preparing for the world's 1st pilot project for the exploitation of marine currents at a commercial scale. *Third European Wave Energy Conference* (σσ. 45-48). Patras: Marine current Turbines Ltd.
- Hardistry, J. (2009). *The analysis of tidal stream power*. Chichester: John Wiley and Sons Inc.
- Harrison, J. T. (1987). *The 40MW OTEC Plant at Kahe Point, Oahu, Hawaii: A Case study of Potential Biological Impacts*. Honolulu, Hawaii: U.S Department of Commerce.
- Jacob, A. (2006). *Marine Current Turbines*. Glasgow: University of Strathclyde.
- Kirke, B. (2014). *Developments in ducted water current turbines* . Mawson Lakes: University of South Australia.
- Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2013). 2D CFD Modeling of H-Darrieus Wind Turbines using a transition Turbulence Model. *68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association* (σσ. 15-16). Catania: University of Catania.
- Le Gourieres, D. (1982). *Wind Power Plants, Theory and Design*. Oxford: Pergamon Press Ltd.
- Nichols-Lee, R. F. (2011). *Adaptive Composite Blades for Horizontal Axis Tidal Turbines*. Southampton: Fluid Structure Interactions Research Group.
- Polagye, B., Kawase, M., & Malte, P. (2009). In-stream tidal energy potential of PugetSound, Washington. *Journal of Power and Energy* , 571-587.

Roberts, A., & Khan, Z. (2016). *Current tidal power technologies and their suitability for applications in coastal and marine areas*. Bournemouth: Springerling.com.

Saeterstad, M. L. (2011). *Dimensioning loads for a tidal turbine-Master of Science in Energy and Environment*. Oslo: Norwegian University of Science and Technology.

Southall, B. L. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* , 401-509.

Turnock, S., & Wood, R. (2009). *Tidal turbines that survive?* Southampton: National Centre for Advanced Tribology at Southampton.

Wilson, B., & Batty, R. S. (2007). *Collision Risks between Marine Renewable Energy Devices and Mammals, Fish and Diving Birds*. Oban: Scottish Association of Marine Science.

Αράβας, Ν. (2005). *Μηχανική των υλικών - Ανάλυση Ελαστικών Δοκών*. Βόλος: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.

ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (2010). *Διερεύνηση του θαλάσσιου ρεύματος στην περιοχή του πορθμού του Ευρίπου*. Αθήνα.

Κονδύλης, Δ. Μ. (2013). *Υδροενεργειακή ανάλυση παλιρροϊκών ρευμάτων στο στενό Ρίου-Αντιρρίου*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Σταπουντζής, Ε. (2013). *Σημειώσεις Αεροδυναμικής*. Βόλος: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.

Φουρνιώτης, Ν. (2009). *Τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας του Πατραϊκού Κόλπου με έμφαση στον υπολογισμό ρευμάτων στην παράκτια ζώνη του λιμένα Πατρών*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΝ ΕΤΑΙΡΙΩΝ ΠΟΥ
ΔΡΑΣΤΗΡΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΑΛΙΠΡΟΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

<http://www.openhydro.com>

<http://www.alstom.com>

<https://www.smd.co.uk>

<http://www.orpc.co/>

<http://www.marineturbines.com/>

<http://www.minesto.com>

<https://www.gerenewableenergy.com>

<http://www.tidallagoonpower.com/>

<http://www.bps.energy.com/>

<http://www.aquamarinepower.com/>